



Otimização energética de estufas de secagem

PEDRO PERSEGANI LOUREIRO

Julho de 2017

Otimização energética de estufas de secagem

| Departamento de Engenharia Química |
| Mestrado Energia e Biorrefinaria |

Pedro Persegani Loureiro
Julho, 2017

Orientação ISEP:

Professora Doutora Paula Neto
Professora Doutora Anabela Guedes

Orientação na empresa:

Engenheiro José Rocha Ferreira

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos que ajudaram a sua realização e aos quais estarei eternamente grato.

Em primeiro lugar, a nível pessoal, quero agradecer à minha família, por me mostrar e ensinar que todos os obstáculos são ultrapassáveis, existindo com o propósito de dar sentido e objetivo à nossa vida. Agradecer à minha namorada, Rita, pelo apoio, transmissão de confiança e força em todos os momentos de maior dificuldade.

Da empresa, quero agradecer ao meu orientador Engenheiro Rocha Ferreira pela sua disponibilidade e por me ter orientado e proporcionado todas as condições para a elaboração da minha tese. Agradecer à Doutora Liliana Sousa, Engenheiro Manuel António e Sr. Miguel pela simpatia e disponibilidade, ajudando a compreender todo o processo de funcionamento da empresa.

Do ISEP, igualmente agradecer às minhas orientadoras, Engenheira Paula Neto e Engenheira Anabela Guedes, pela partilha de conhecimentos, disponibilidade, simpatia e pelas valiosas contribuições para este trabalho.

Agradecer aos meus colegas de mestrado, que me acompanharam não só durante a realização desta dissertação como também por todo o mestrado em si, partilhando e transmitindo conhecimentos e pelo companheirismo proporcionado.

Agradecer aos meus amigos, que à maneira deles me acompanharam ao longo desta etapa, e me apoiaram e ajudaram sempre que precisei.

O meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

Sumário

Esta dissertação de mestrado teve como objetivo a otimização energética de estufas de secagem, utilizadas para a secagem de moldes em gesso, na empresa ARCH Valadares. Esta otimização pretende diminuir o consumo energético das mesmas e consequentemente os custos associados a este consumo.

De forma a estudar algumas medidas de otimização a aplicar nas respetivas estufas foi necessário realizar um levantamento energético do atual consumo de energia. Ao realizar o respetivo levantamento verificou-se que os custos associados rondavam os 505 €/Estufa.

Após a realização do levantamento definiu-se cinco medidas de otimização: implementação de isolamento térmico, vedação de fugas de ar, controlo da humidade, otimização do tempo dos ciclos e o reaproveitamento de energia dos gases de exaustão.

Após a análise das medidas de otimização acima mencionadas, verificou-se que as reduções nos custos foram: 4% para a implementação de isolamento térmico, 24% para a vedação das fugas de ar, 16% para o controlo da humidade, 27% para a otimização dos tempos dos ciclos e 48% para o reaproveitamento de energia dos gases de exaustão. Foi igualmente estudado o impacto na redução de custos a conjugação de três das medidas referidas anteriormente, sendo estas a vedação das fugas de ar, controlo da humidade e a otimização dos tempos dos ciclos, que atingiu uma redução total de 52%. Esta hipótese será a mais vantajosa para a empresa.

Relativamente aos investimentos necessários para a aplicação das medidas estudadas, apenas três necessitam de investimento, que é o caso da implementação de isolamento térmico, a vedação das fugas de ar e o reaproveitamento de energia dos gases de exaustão, sendo que os tempos de retorno de investimentos necessários são de 9, 1 e 2 meses respetivamente. As outras duas medidas, controlo da humidade e otimização do tempo dos ciclos não necessitam de qualquer investimento, permitindo assim que a empresa obtenha lucro imediato após aplicação de ambas as medidas.

Palavras-chave: Otimização energética, Secagem, Moldes, Estufas

Review

This dissertation of master degree was aimed at the energy optimization of dryers, used for the drying of molds in plaster. This optimization aims to reduce their energy consumption and consequently the costs associated with this consumption.

In order to study some optimization methods to be applied in the respective dryers, it was necessary to conduct an energy survey to understand the current behavior in relation to energy consumption. When carrying out the respective survey it was verified that the associated costs were around 505 € per dryer.

After the survey was carried out, five optimization methods were studied: application of thermal insulation, air leakage sealing, humidity control, cycle time optimization and exhaust gas reuse.

After the optimization methods were analyzed, it was verified that reductions of costs were: 4% for the thermal insulation implementation, 24% for the air leakage sealing, 16% for the humidity control, 27% for the cycle times optimization and 48% for the reuse of exhaust gases. The impact on cost reduction was also studied in the combination of three of the previously mentioned methods, such as the air leakage sealing, the humidity control and the cycle time optimization, which achieved a total reduction of 52%. This was the most appealing hypothesis to be applied by the company.

With regard to the investments required for the application of the methods studied, only three methods require investment, such as the implementation of thermal insulation, the air leakage sealing and the exhaust gas reuse, which payback periods are 9, 1 and 2 months respectively. The other two methods, humidity control and cycle time optimization do not require any investment, thus allowing the company to make an immediate profit after applying both methods.

Key-words: Energy optimization, Drying, Molds, Dryers

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	História da Empresa	1
1.2	Instalações industriais	3
1.3	Produtos e tipos de materiais produzidos	4
1.4	Métodos de Produção	6
1.4.1	Produção das Peças Cerâmicas	7
1.4.2	Produção dos Moldes.....	10
1.5	Estado dos consumos Energéticos em Portugal	12
1.6	Enquadramento e Objetivo do trabalho	17
1.7	Organização da dissertação.....	18
2	Processo de Secagem.....	19
2.1	Conceitos Gerais.....	19
2.1.1	Conceitos básicos	19
2.1.2	Carta psicométrica	23
2.1.3	Classificação dos materiais.....	24
2.1.4	Cinética de secagem.....	25
2.1.5	Curva de Bigot	29
2.2	Equipamentos de secagem	30
2.2.1	Equipamentos mais utilizados.....	31
3	Estufas de Secagem.....	33
3.1	Descrição e Funcionamento das estufas.....	33
3.2	Dimensões e desenhos técnicos	40
4	Análise energética às estufas de secagem	43
4.1	Levantamento Energético das Estufas	43
4.2	Balanços	54
4.2.1	Balanços de Massa	54

4.2.2	Balanços de Energia	55
4.3	Cálculo das Perdas:.....	58
5	Medidas de otimização	63
5.1	Plano de otimização energética das estufas	63
5.1.1	Implementação de isolamento térmico	64
5.1.2	Vedação de fugas de ar	65
5.1.3	Controlo da humidade	67
5.1.4	Otimização do tempo dos ciclos.....	69
5.1.5	Reaproveitamento de energia dos gases de exaustão.....	71
5.1.6	Combinação das medidas de otimização estudadas.....	74
5.1.7	Resumo geral das medidas de otimização estudadas.....	74
6	Análise Económica.....	77
7	Conclusões e propostas de trabalhos futuros.....	81
	Bibliografia	83
A.	Aparelhos utilizados para realização de ensaios.....	87
A.1	Anemómetro.....	87
A.2	Aparelho de registo de temperatura e humidade relativa do ar.	87
A.3	Balança Digital.....	88
A.4	Pinça amperimétrica	88
B.	Gás Natural.....	89
C.	Eletricidade.....	91
D.	Dados utilizados para os cálculos.....	95
E.	Carta psicométrica	97
F.	Estudo da curva de secagem.....	99
G.	Exemplos de cálculo	101

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Desenho representativo da "Fábrica Cerâmica de Valadares" no ano de 1921.	1
Figura 1.2 - Logotipo da empresa ARCH Valadares.....	2
Figura 1.3 - Vista aérea das instalações industriais.....	3
Figura 1.4 – Exemplos de peças produzidas pela ARCH Valadares.	4
Figura 1.5 - Exemplo do material Highcer®.	6
Figura 1.6 - Diagrama simplificado da sequência de produção.	7
Figura 1.7 - Dependência Energética de Portugal ao longo dos anos. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)	13
Figura 1.8 - Comparação da Dependência Energética de Portugal com a União Europeia. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)	14
Figura 1.9 - Evolução da Intensidade Energética em Portugal ao longo dos anos. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)	14
Figura 1.10 - Comparação da Intensidade Energética em Portugal com a União Europeia em (tep/M€). (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)	15
Figura 1.11 - Evolução das emissões dos GEE nos últimos anos em Portugal. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)	15
Figura 1.12 - Emissões per capita na União Europeia em 2013 (ton CO ₂ /habitante). (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)	16
Figura 1.13 - Evolução do Consumo Total de Energia Primária (tep).....	16
Figura 1.14 - Evolução do Consumo Total de Energia Final por setor de atividade (tep).....	17
Figura 2.1 - Curvas de Humidade de equilíbrio para diversos materiais, adaptado de (Geankoplis, 1993).	20
Figura 2.2 - Representação gráfica da humidade livre, adaptado de (Ribeiro, 2012)	21
Figura 2.3 - Representação gráfica da humidade ligada, adaptada de (Ribeiro, 2012)	22
Figura 2.4 - Representação gráfica da humidade desligada, adaptada de (Ribeiro, 2012).....	22
Figura 2.5 - Carta psicométrica à pressão atmosférica, retirada de (Fenix Tecnico, 2015).....	23
Figura 2.6 - a) Representação gráfica da humidade do sólido ao longo do ensaio, b) Representação gráfica da velocidade de secagem do sólido em função da humidade, adaptado de (Geankoplis, 1993).....	26
Figura 2.7 - Representação gráfica da taxa da curva de secagem simplificada, adaptada de (Coulson, 2002).....	27
Figura 2.8 - Exemplo de uma curva de Bigot característica.	29
Figura 2.9 - Relação entre os custos de operação, taxa de produção e tipo de secagem, adaptado de (Coulson, 2002)	31
Figura 3.1 - Representação da conduta de ar quente, A) e do conjunto conduta/ventilador/queimador, B).	34

Figura 3.2 - Representação das condutas de exaustão em várias perspetivas, A) Vista de frente, B) Vista de cima e C) vista lateral.....	35
Figura 3.3 - Representação dos circuladores de ar "Dryflex", em que A) corresponde a vista de cima e B) vista lateral.....	36
Figura 3.4 - Representação do conjunto ventilador/queimador em duas perspetivas, sendo a A) uma vista de cima e a B) uma vista lateral.....	37
Figura 3.5 - Curva da temperatura estabelecida pelo programa para a secagem de moldes.....	38
Figura 3.6 - Curva da humidade estabelecida pelo programa para a secagem de moldes.....	39
Figura 3.7 - Representação seccional de uma estufa de secagem.....	41
Figura 3.8 - Representação das cinco estufas de secagem com uma visão superior.....	42
Figura 4.1 - Esquema simplificado do sistema de secagem.....	43
Figura 4.2 - Massa dos moldes à entrada e saída do ciclo de secagem.....	45
Figura 4.3 - Divisão da conduta dos gases de exaustão em 4 partes iguais.....	47
Figura 4.4 - Corte da conduta principal de exaustão onde foram efetuadas as medições.....	48
Figura 4.5 - Variação da temperatura do ar fresco à entrada do queimador.....	49
Figura 4.6 - Variação da humidade do ar fresco à entrada do queimador.....	49
Figura 4.7 - Variação da temperatura no interior da câmara da estufa.....	50
Figura 4.8 - Variação da humidade no interior da câmara da estufa.....	50
Figura 4.9 - Curva de secagem do molde em estudo.....	51
Figura 4.10 - Variação da massa de água do molde ao longo do ciclo de secagem.....	52
Figura 4.11 – Representação da divisão efetuada na zona das fugas.....	52
Figura 4.12 - Representação das transferências de calor numa parede vertical.....	58
Figura 4.13 - Comparação da energia dissipada pela parede lateral e teto com as restantes superfícies da estufa.....	61
Figura 5.1 - Esquema representativo das estufas de secagem com o isolamento aplicado.....	64
Figura 5.2 - Esquema representativo das portas das estufas vista de frente (imagem à esquerda) e vista lateral (imagem à direita).....	66
Figura 5.3 - Corte da borracha aplicada para vedação da zona 1.....	66
Figura 5.4 - Representação do vedante de tipo escova utilizada para a vedação da zona 2.....	67
Figura 5.5 - Poupanças obtidas para as várias reduções de caudal de ar.....	68
Figura 5.6 - Representação da poupança obtida para os diferentes tempos de ciclo impostos.....	70
Figura 5.7 - Esquema da implementação do reaproveitamento dos gases de exaustão.....	71
Figura 5.8 - Representação da energia fornecida pelos gases de exaustão (cor laranja) e a energia fornecida pelo gás natural (cor azul).....	72
Figura 5.9 - Esquema do reaproveitamento dos gases de exaustão para as 5 estufas de secagem.....	73
Figura 5.10 - Comparação dos custos totais das medidas de otimização estudadas.....	75
Figura C.1 – Distribuição horária por fração.....	92

Figura E.1 - Carta psicométrica utilizada.....	98
Figura F.1 - Curva de secagem do gesso.....	99

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Dimensões referentes às estufas de secagem.....	40
Tabela 4.1 - Composição da pasta para a produção de moldes do ensaio experimental.	44
Tabela 4.2 - Dados da carga de um ciclo de secagem para um determinado ensaio.	45
Tabela 4.3 - Dados referentes ao consumo de gás natural para os anos 2010 e 2011.	46
Tabela 4.4 - Dados referentes ao consumo elétrico de uma estufa de secagem.	46
Tabela 4.5 - Dados obtidos e cálculo do caudal de ar na conduta de exaustão.	47
Tabela 4.6 - Valores obtidos do escoamento dos gases de exaustão.	48
Tabela 4.7 - Valores de escoamento dos gases de exaustão para o ensaio experimental com duração de 139 horas.	48
Tabela 4.8 - Valores obtidos para as fugas na zona superior (Q_{Fs}).	53
Tabela 4.9 - Valores obtidos para as fugas na zona inferior (Q_{Fi}).	53
Tabela 4.10 - Valores das fugas obtidas no ensaio experimental.	54
Tabela 4.11 - Resultados obtidos nos balanços de energia.	57
Tabela 5.1 - Custos de funcionamento de uma estufa em condições normais.	63
Tabela 5.2 - Valores obtidos com a aplicação do isolamento térmico.	65
Tabela 5.3 - Valores obtidos com a eliminação das fugas de ar.	67
Tabela 5.4 - Valores obtidos com o controlo da humidade.	68
Tabela 5.5 - Valores obtidos para os diferentes tempos de ciclo estipulados.	69
Tabela 5.6 - Poupança obtida com o reaproveitamento dos gases de exaustão durante 70 horas.	72
Tabela 5.7 - Resultados obtidos para a conjugação de otimizações estudadas.	74
Tabela 5.8 - Resultados obtidos para as diferentes medidas estudadas.	74
Tabela 6.1 - Valores da análise económica para a implementação de isolamento térmico.	77
Tabela 6.2 - Tempo de retorno do investimento para a aplicação de isolamento térmico.	78
Tabela 6.3 - Valores da análise económica para a eliminação de fugas de ar.	79
Tabela 6.4 - Valores da análise económica para o reaproveitamento dos gases de exaustão.	80
Tabela A.1 – Características do Anemómetro utilizado.	87
Tabela A.2 – Características do aparelho Datalogger.	88
Tabela A.3 - Características da balança digital.	88
Tabela A.4 - Características da pinça amperimétrica.	88
Tabela B.1 - Composição do Gás Natural.	89
Tabela B.2 - Dados característicos do gás natural às condições adquiridas.	89
Tabela C.1 - Preço unitário da eletricidade por fração horária.	91
Tabela C.2 - Distribuição horária por fração.	92

Tabela C.3 - Custos de eletricidade para um ciclo normal (175 horas).	93
Tabela C.4 - Custos de eletricidade para o ensaio experimental (139 horas).	93
Tabela C.5 - Custos de eletricidade para o ciclo otimizado (127 horas).	93
Tabela D.1 - Dados utilizados para a realização de cálculos.	95
Tabela D.2 - Dados utilizados para os cálculos das perdas de energia.	95

Nomenclatura

Símbolo	Descrição	Unidades
A	- Área	[m ²]
A _S	- Área de superfície	[m ²]
c _p	- Calor específico a pressão contante	[kJ/(kg.K)]
E _{Ar}	- Excesso de ar	[%]
F _{cP}	- Fator de correção da pressão	[-]
F _{cT}	- Fator de correção da temperatura	[-]
g	- Constante gravitacional universal	[m/s ²]
H	- Energia por ciclo	[kJ/Ciclo]
h	- Entalpia específica	[kJ/kg]
h _{Conv}	- Coeficiente de convecção	[W/(m ² .K)]
K	- Condutividade térmica	[W/(m.K)]
L	- Dimensão característica	[m]
ṁ	- Caudal mássico	[kg/Ciclo]
MM	- Massa molecular	[kg/kmol]
Nu	- Número de Nusselt	[-]
P	- Pressão	[bar]
PCI	- Poder calorífico inferior	[kJ/kg]
Pr	- Número de Prandtl	[-]
P _{Re}	- Pressão relativa	[bar]
Q	- Caudal volumétrico	[m ³ /s]
q _{Cond}	- Transferência de calor por condução	[J/s]
q _{Conv}	- Transferência de calos por convecção	[J/s]
q _P	- Perdas de calor	[kJ/Ciclo]
q _{Rad}	- Transferência de calor por radiação	[J/s]
R	- Constante dos gases perfeitos	[(atm.m ³)/(kmol.K)]
Ra _L	- Número de Rayleigh	[-]
T	- Temperatura	[°C]
v	- Velocidade de escoamento	[m/s]
Y _{esp}	- Humidade específica	[kg/kg Ar Seco]
Y _R	- Humidade relativa	[%]

Letras Gregas	Descrição	Unidades
ε	- Emissividade	[-]
β	- Coeficiente de expansão térmica	[K ⁻¹]
σ	- Constante de Stefan Boltzmann	[W/(m ² .K ⁴)]
μ	- Viscosidade cinemática	[m ² /s]
ρ	- Massa volúmica	[kg/m ³]
λ	- Calor latente	[kJ/kg]

1 Introdução

Neste capítulo procura-se introduzir vertentes relacionadas com a empresa em estudo, relativamente à sua história e aos processos usados na produção de materiais cerâmicos. É também analisada a evolução da situação energética em Portugal e assim enquadrada a empresa ARCH Valadares.

1.1 História da Empresa

Em meados do ano de 1921, mais concretamente a 25 de Abril, surgiu uma das empresas mais influentes na área da cerâmica sanitária em Portugal, a “Fabrica Cerâmica de Valadares” - FCV. Situada a norte do país, Vila Nova de Gaia, a FCV começou por focar-se, ao longo da década de 20, na produção de artigos de barro vermelho, como tijolos, telhas, fornos de cozer pão, garfos, sifões, azulejos variados e loiça sanitária. Na Figura 1.1 encontra-se um desenho representativo da “Fábrica Cerâmica de Valadares” nos seus primórdios.



Figura 1.1 - Desenho representativo da "Fábrica Cerâmica de Valadares" no ano de 1921.

Entrando, na década de 30 a empresa deu início à produção de loiça de faiança, à qual se dedicou por mais de 20 anos, conseguindo implementar o seu nome e estatuto devido à qualidade, requinte da variedade de peças e desenho na área da loiça decorativa portuguesa.

Graças a esse reconhecimento, a FCV sofreu um grande progresso industrial, obrigando assim, por necessidade, a que as suas instalações fabris fossem expandidas no ano de 1949.

Nos finais da década de 70, no ano de 1979, a FCV encontrava-se muito bem posicionada comercialmente, conseguindo uma afirmação segura não só a nível

nacional, como a nível internacional, sendo que o seu prestígio de qualidade e capacidade técnica já ultrapassava fronteiras.

Durante a década de 80 a empresa passou a seguir as tendências mundiais, existindo uma preocupação sectorial com a especialização dos produtores, focando-se exclusivamente na produção de loiça sanitária e acessórios cerâmicos para quartos de banho.

Já na década de 90 a marca Valadares encontrava-se em mais de 70 países, sendo que a sua capacidade exportadora atingia níveis históricos e notáveis para a empresa.

No ano de 2005, com a necessidade de existir sempre inovação de forma a garantir competitividade no mercado na área da cerâmica sanitária, a FCV desenvolveu e passou a comercializar peças sanitárias feitas a partir de um novo material inovador, o Gresanit®, acabando mesmo por ganhar no ano de 2008 uma Menção do Júri na feira Tektónica08, evento dedicado à inovação em materiais de construção, prestigiando deste modo a empresa.

Apesar da empresa apresentar uma forte afirmação no mercado externo, a FCV passou por uma época de crise acentuada nos anos de 2011 e 2012, acabando mesmo por entrar em processo de liquidação no final do ano de 2012. Mas em setembro de 2014 a unidade fabril de cerâmica de Valadares reergueu-se com uma nova vida, passando a ser denominada por ARCH SA (Advanced Research Ceramic Heritage), conseguindo apresentar uma nova realidade empresarial, que tem como principal objetivo a recuperação da atividade industrial e comercial da marca Valadares. O logotipo da empresa encontra-se apresentada na Figura 1.2.



Figura 1.2 - Logotipo da empresa ARCH Valadares.

Após ganhar uma nova vida, a empresa já é responsável pelo desenvolvimento de outro material inovador, o HighCer®, com características que superam a de outros materiais cerâmicos atualmente no mercado (ARCH Valadares, 2017).

A ARCH aposta numa estratégia voltada para o futuro, aliando ao legado histórico da marca Valadares. Este novo projeto industrial tenta tirar partido de parte das instalações existentes e da experiência dos trabalhadores que foi adquirida ao longo de mais de 90 anos de existência.

1.2 Instalações industriais

Atualmente, a ARCH SA conta com uma área de produção de cerca de 30.000 m², sendo esta dividida por vários setores devidamente classificados com as etapas de produção. Na Figura 1.3 pode-se visualizar uma vista aérea das instalações industriais com a respetiva legenda.

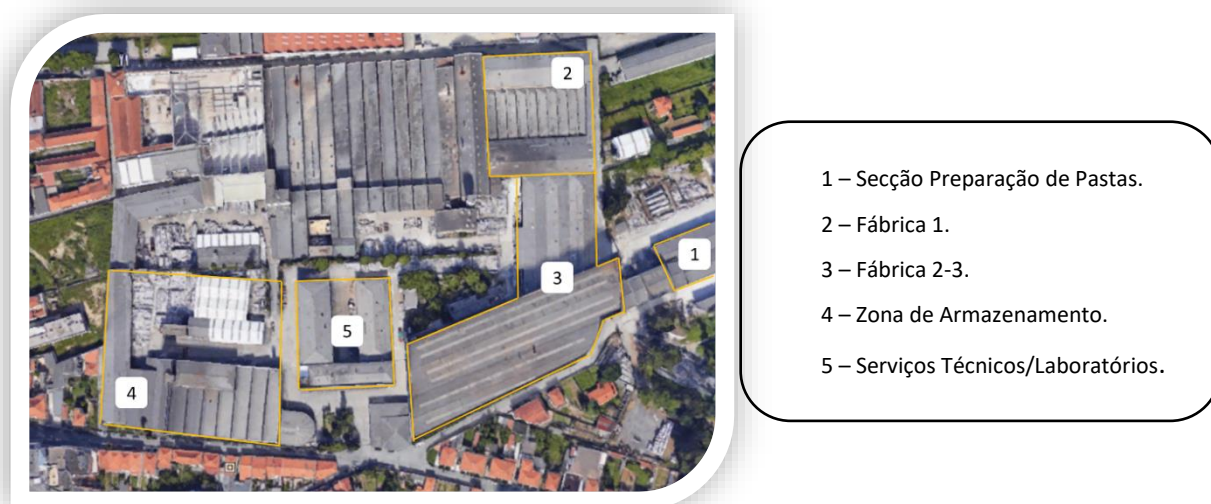


Figura 1.3 - Vista aérea das instalações industriais.

Os setores principais são a Secção de Preparação de Pastas, a Fábrica 1, Fábrica 2-3, os Serviços Técnicos/Laboratórios e a Zona de Armazenamento. Na secção de preparação de pastas, como o próprio nome indica, é onde se realiza a preparação das pastas que constituem as peças cerâmicas. Na fábrica 1 situa-se uma olaria que é responsável pela criação das peças cerâmicas constituídas por Vitreous China. Na fábrica 2-3 é onde se encontra a maior área de produção, contendo uma olaria responsável pela criação das peças constituídas por Gresanit® e Highcer®. Neste espaço localiza-se também a zona de criação dos moldes e madres, estufas de secagem, secção de vidragem, forno de cozedura e zona de reparação de peças danificadas. (Sousa, 2017)

1.3 Produtos e tipos de materiais produzidos

A empresa ARCH concebe artigos que apenas estão compreendidos no setor de cerâmicos sanitários, e que podem ser diferenciadas nas seguintes peças: bacias (sanitas), bidés, urinóis, lavatórios, bases de chuveiros e pequenas peças de acessórios. Dentro destes artigos existe ainda uma grande variedade de designs de forma a expandir as opções de escolha e a agradar os consumidores finais, criando um conjunto de coleções abrangendo vários gostos e interesses. Na Figura 1.4 encontra-se um exemplo dos artigos produzidos pela empresa.



Figura 1.4 – Exemplos de peças produzidas pela ARCH Valadares.

Como o estudo e criação de novos designs começam a ficar mais saturados, a empresa tentou expandir o seu leque de produtos criando novos tipos de materiais, tornando as suas peças mais inovadoras e obtendo características mecânicas revolucionárias.

Atualmente a ARCH produz peças cerâmicas constituídas por Vítreato China (material mais comum na indústria das peças cerâmicas sanitárias), Gresanit® e HighCer®. De seguida, apresenta-se uma descrição mais detalhada dos materiais já referidos.

➤ Vitreous China:

O termo Vitreous China consiste basicamente no conjunto de um material cerâmico, como a porcelana, com um revestimento à base de vidro. Esse revestimento proporciona uma maior durabilidade e confere um aspeto mais brilhante, sendo mais atrativo em termos estéticos. (Imports, Trade Winds, 2015)

Para além dessas vantagens, esse revestimento consegue aumentar a resistência mecânica da cerâmica, evitando arranhões, confere à peça cerâmica uma absorção de

água inferior a 0,5% em massa, garante uma superfície mais lisa e limpa e proporciona uma boa resistência a ataque químicos e bacteriológicos. Todas estas vantagens favorecem o uso do Vitreous China como um material cerâmico para a conceção de peças sanitárias, sendo por isso o conjunto de material mais comumente encontrado nessa mesma área. (Ceramic Industry, 2010) (Kitchen Bath Trends, 2013)

Um aspeto que vem a limitar a sua utilização, é o facto de o Vitreous China apresentar um elevado potencial de contração e deformação durante o seu processo de fabrico, limitando a sua utilização para a produção de peças cerâmicas com maiores dimensões, como é exemplo as bases de chuveiros.

➤ Gresanit®:

O Gresanit® veio inovar a produção de materiais cerâmicos. Criado e produzido pelo grupo de Inovação e Desenvolvimento da empresa, este material, para além de substituir a utilização do Grés Comum¹, vem acrescentar novas características e resolver a grande limitação do uso do Vitreous China na produção de peças com maiores dimensões. As principais características que torna este material inovador e vantajoso é o facto de permitir obter peças mais resistentes (grande resistência à fendilhagem), mais finas e conseqüentemente mais leves, tornando então possível a criação de peças de grandes dimensões como é exemplo as bases de chuveiros. No que toca à absorção de água, este material apresenta uma absorção superior comparativamente ao Vitreous China, atingindo um valor a rondar os 4,5%, mas graças às suas características, essa absorção superior acaba por não ter nenhum impacto negativo na sua utilização. Outra grande vantagem do Gresanit® é que da sua produção não resultam desperdícios, sendo um material reciclável, diminuindo a extração de matérias primas para o seu fabrico, tornando-o mais amigo do ambiente. (ARCH Valadares, 2017)

1

➤ Highcer®:

O Highcer® foi o mais recente material desenvolvido pelo Núcleo de Inovação e Desenvolvimento da ARCH (mesmo grupo responsável pela criação do Gresanit®). As principais vantagens deste novo material cerâmico são a sua impermeabilidade, o facto de ser ultrarresistente, ultrafino, hidrófugo e antiderrapante. Assim sendo, este material

¹ Grés Comum – Material feito a partir de argila de grão fino, plástica, sedimentária e refratária, que suporta altas temperaturas.

apresenta uma resistência mecânica consideravelmente superior a outros materiais cerâmicos, podendo ser destinado ao desenvolvimento de produtos cuja aplicação está sujeita a ambientes mais exigentes e severos. Uma vantagem relacionada com o seu processo de produção é o facto de não necessitar de passar pela etapa de vidragem, processo que vai ser descrito no subcapítulo 1.4. Na Figura 1.5 é possível visualizar um exemplo do material Highcer®. (ARCH Valadares, 2017)



Figura 1.5 - Exemplo do material Highcer®.

1.4 Métodos de Produção

O processo de produção de peças cerâmicas revela-se como um processo extenso e complexo em que as fases estão compreendidas desde a criação e idealização do esboço de uma peça, até a obtenção da peça final.

Como ponto de partida tem-se então a idealização da peça, realizando um esboço da mesma até ser possível criar uma peça modelo. Com o modelo criado, este passa por vários testes até que se encontrem as condições desejadas para que se possa passar à criação do primeiro molde. Deste molde original, são criadas várias peças, estado todas sujeitas a vários estudos e testes de forma a aperfeiçoar a peça final desejada. Com a obtenção do molde devidamente pretendido, torna-se possível passar à criação das madres. As madres correspondem às peças que partem do molde original e são utilizadas para a conceção de novos moldes, podendo mesmo ser classificadas como um “molde” dos moldes. Estas madres geralmente são constituídas por gesso,

borracha ou resina, tendo um período de vida longo, podendo assim ser reutilizadas repetidas vezes. Quando as madres se encontram prontas a serem utilizadas, dá-se início à produção dos moldes. A etapa de produção de moldes encontra-se mais detalhadamente descrita no subcapítulo 1.4.2.

De uma maneira geral a produção das peças cerâmicas passa por duas fases prévias:

- Preparação da Pasta
- Produção dos Moldes

Na Figura 1.6 encontra-se representado um diagrama da sequência de produção simplificado.

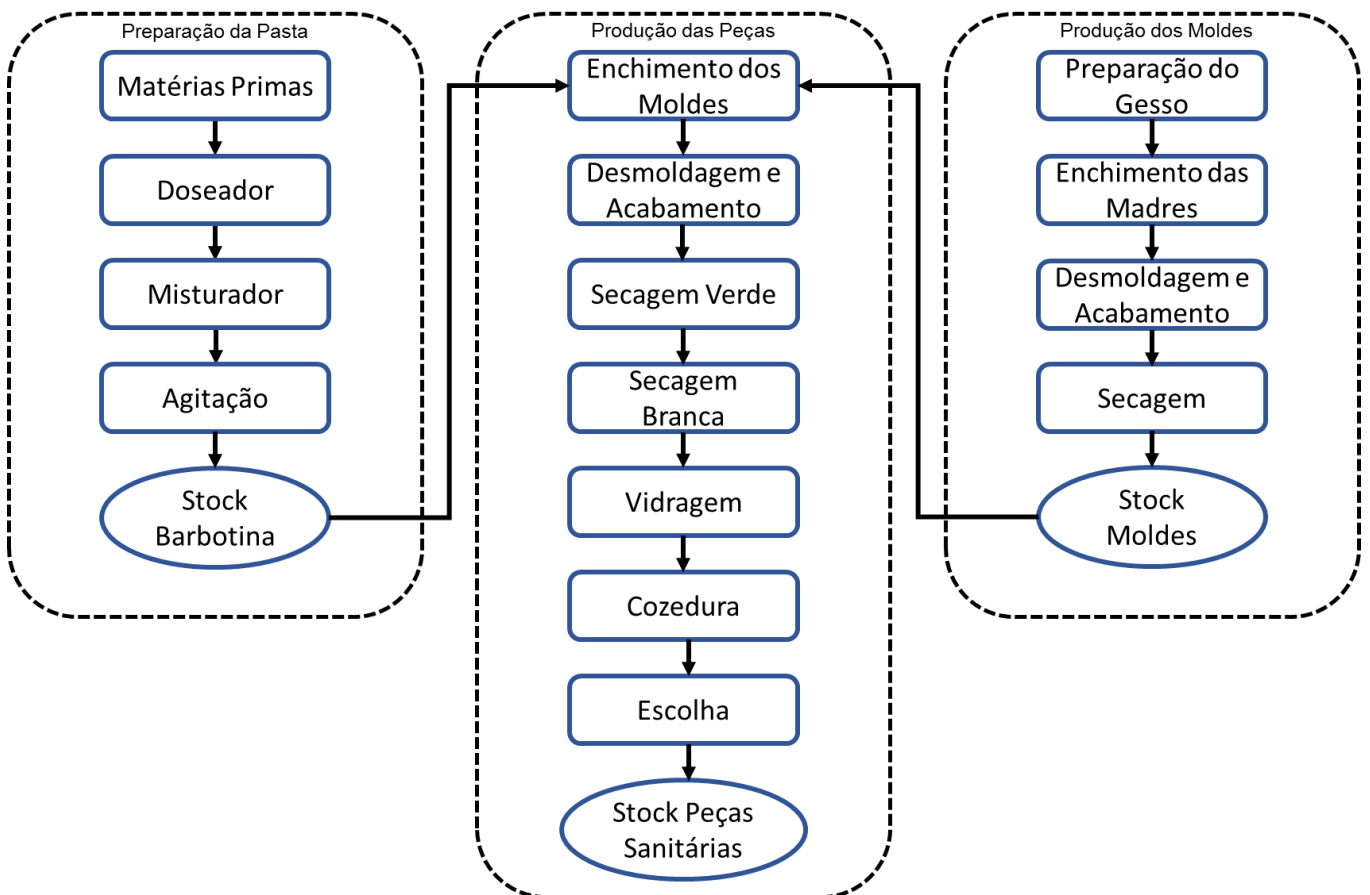


Figura 1.6 - Diagrama simplificado da sequência de produção.

1.4.1 Produção das Peças Cerâmicas

A produção de peças cerâmicas pode ser dividida em sete etapas distintas, as quais serão abordadas e explicadas em seguida.

➤ Preparação da barbotina:

Nesta etapa de produção é onde se prepara a pasta (barbotina) que irá constituir a peça cerâmica final. Para tal, existe um devido doseamento das matérias primas utilizadas pela empresa, como é exemplo as argilas, caulinos, feldspatos e água. Os vários materiais são posteriormente misturados e agitados até se obter a pasta final devidamente homogeneizada.

➤ Enchimento dos moldes:

Para que se possa dar início a esta etapa, os moldes e a barbotina têm de se encontrar devidamente preparados. Com ambos preparados, dá-se início ao enchimento dos moldes com a barbotina na secção de olaria. Durante esta etapa de enchimento, efetua-se a injeção de ar comprimido no interior dos moldes de forma a forçar a barbotina contra a superfície do molde, dando forma e definição à peça, ajudando também à remoção de excessos de pasta que estes possam conter. Após este processo de vazamento e injeção de ar, as peças permanecem em repouso no interior do molde durante um período de tempo, de forma a ser possível passar à desenformação.

➤ Desmoldagem e Acabamento:

Nesta etapa de desmoldagem e acabamento, as peças que se encontram no interior dos moldes são extraídas para bancadas, ficando sujeitas a determinadas condições de temperatura e humidade no interior da olaria. Já nas bancadas, as peças passam por vários processos de acabamento, desde a furação destas até à terminação de pequenos detalhes.

➤ Secagem:

O processo de secagem pode ser separado em dois processos bem distintos, nomeadamente a secagem verde e secagem branca. A primeira consiste na secagem das peças cerâmicas no interior das olarias, ficando as peças em repouso durante um período de tempo de aproximadamente 24 horas, sujeitas às condições ambientais existentes no interior destas. Geralmente, as peças saem da olaria com uma percentagem de humidade a rondar os 13%. Relativamente à secagem branca, esta consiste na utilização de estufas de secagem, de forma a terminar esta etapa e garantir que as peças se apresentam devidamente secas, ou seja, que apresentem uma

humidade inferior a 1%. Caso as condições climatéricas sejam as mais favoráveis, torna-se possível obter uma secagem completa da peça sem ter de se recorrer à secagem branca. Essas condições climatéricas geralmente são obtidas nas estações do ano mais quentes, ou seja, o verão. Após a secagem, é efetuada uma inspeção às peças cerâmicas de forma a averiguar se podem dar continuidade no processo, sendo esta inspeção denominada de escolha em cru.

➤ Vidragem:

A vidragem consiste basicamente no revestimento das peças com um esmalte rico em sílica, que na presença de outros constituintes, quando são submetidos a temperaturas elevadas (tratamentos térmicos), permite a criação de vidro. Este revestimento tem enorme importância na concessão das peças, pois, para além de assegurar um aspeto liso e brilhante, concede um aumento da sua impermeabilidade, dureza e uma maior resistência química, mecânica e bacteriológica. Para efetuar a vidragem são utilizadas pistolas de ar comprimido, assegurando jatos de vidro contra as peças cerâmicas. Este processo é também responsável pela conceção de cor às peças através da coloração do vidro antes do processo de vidragem. Com as peças cerâmicas devidamente vidradas, pode dar-se seguimento ao processo de cozimento no forno (tratamento térmico).

➤ Cozedura (Forno):

Esta etapa do processo consiste basicamente na inserção das peças cerâmicas no interior de um forno de forma a passarem por um processo de cozedura. No interior do forno, as peças ficam sujeitas a temperaturas a rondar os 1200°C, sendo que o tempo dos ciclos podem ser aproximadamente 17 horas. É neste processo que se dará a “selagem” final das peças com a fundição do vidro, sendo a final conformação das características pretendidas, como a resistência mecânica, química, bacteriológica e a impermeabilidade. É nesta fase que vai ser possível reconhecer a ocorrência de erros nas etapas anteriores, pois, pequenos defeitos que possam ter passado despercebidos nas outras etapas são significativamente ampliados durante a cozedura, podendo originar deformações, fendilhagem e mesmo quebras das peças cerâmicas.

➤ Escolha e Armazenamento:

Com a cozedura devidamente efetuada, pode-se prosseguir para o processo de escolha e armazenamento, onde as peças são rigorosamente verificadas de forma a detetar falhas e defeitos. Caso estas apresentem um defeito, consoante a gravidade da imperfeição, são classificadas como irrecuperáveis ou recuperáveis. No caso de serem irrecuperáveis, como o próprio nome indica, as peças são imediatamente descartadas. Para as peças recuperáveis, estas são dirigidas para o retoque onde serão devidamente reabilitadas. Ainda dentro da secção de retoque, estas podem ser divididas para o retoque a quente, cujo os danos são mais significativos, e o retoque a frio, em que os danos são mais minuciosos.

Com as peças cerâmicas aptas, estas são devidamente armazenadas num armazém próprio, à espera que possam dar saída das instalações. (Sousa, 2017)

1.4.2 Produção dos Moldes

Como este trabalho está mais focado nos ciclos de secagem dos moldes, que são os responsáveis por dar forma às peças cerâmicas, torna-se importante ter uma noção do seu processo de produção de forma a existir uma melhor perceção da etapa de secagem. Desta forma, é importante fazer uma descrição do processo de produção dos moldes.

Para a conceção dos moldes, utiliza-se como matéria prima principal o gesso. A escolha desta matéria prima foi feita graças à sua capacidade de absorção de água, devido à sua estrutura porosa. O gesso tem ainda a vantagem de transmitir às peças cerâmicas pormenores detalhados nas suas formas finais, apresenta uma superfície durável, e é de baixo custo e de fácil manuseamento. Dentro dos tipos de gesso, são utilizadas duas formas distintas, o denominado gesso normal e o gesso 68S. A escolha do tipo de gesso a utilizar é realizada consoante o tipo de molde a ser preparado, podendo existir uma mistura dos dois tipos conforme a necessidade. Por exemplo, para moldes com dimensões maiores, nomeadamente bases de chuveiros, aumenta-se a quantidade do gesso 68S, de forma a conferir ao molde uma maior resistência mecânica.

➤ Preparação da pasta de gesso:

Inicialmente existe um controlo prévio da matéria prima de forma a averiguar se se encontra nas condições ideais para utilização. Após esse controlo faz-se a preparação

da pasta, realizando a mistura dos gessos e de água, sendo que as porções são escolhidas consoante as finalidades pretendidas, como já foi referido anteriormente. Com a pasta preparada, é realizado um ensaio de fluidez de forma a averiguar se a pasta está nas condições pretendidas.

➤ Preparação da madre:

As madres são então preparadas, antes que sejam preenchidas com a pasta de gesso. Para isso é realizada uma limpeza das suas superfícies, é aplicado um agente desmoldante de forma a facilitar a posterior desmoldagem e é feita a junção de todas as partes que irão compor o molde. Com a madre composta, é feito o fecho da madre com um perfeito ajustamento de todas as partes.

➤ Enchimento da Madre:

Com a madre devidamente preparada, dá-se o seu enchimento com a pasta de gesso/água de uma forma cuidada para que exista uma distribuição homogénea por toda a sua superfície. Esse enchimento é realizado com o auxílio de um funil, até que seja observado um transbordo pelos orifícios de respiração. Caso exista uma fuga de gesso pelas junções das partes que constituem as madres, é utilizado barro de modelação de forma a isolar.

➤ Desmoldagem:

O processo de desmoldagem tem de ser realizado com todo o cuidado possível, pois o molde encontra-se húmido e pode ser facilmente danificado. Para tal existe já todo um processo estipulado de forma a que a desmoldagem seja rigorosa.

➤ Acabamento do molde:

Esta etapa de acabamento apresenta vários processos, que podem estar compreendidos entre a remoção de rebarbas, retoque das imperfeições da superfície do molde que possam determinar irregularidades na superfície das peças cerâmicas, limpeza dos detritos de gesso, etc. Após esta etapa de acabamento, os moldes são devidamente agrupados e identificados.

➤ **Secagem:**

Para que os moldes possam dar início ao ciclo de secagem, estes são empilhados em paletes devidamente distanciadas entre si. Liga-se a estufa, seguindo o programa estipulado para secagem de moldes. Ao longo do ciclo é efetuado um controlo diário das temperaturas e humidades no interior da estufa. À saída das estufas, os moldes geralmente apresentam uma humidade a rondar os 20%, não existindo o interesse de secar os moldes tanto como as peças, ou seja, não é necessário atingir uma humidade abaixo dos 1%. Uma das razões para não existir uma secagem tão acentuada advém da grande capacidade de absorção de água por parte do gesso, pois se este estiver demasiado seco, uma vez exposto ao ar atmosférico, o molde irá absorver alguma humidade contida no ar, tendo sido gasto energia desnecessária para a secagem excessiva. Outra razão para não secar excessivamente os moldes está relacionada com o fim a que se destinam que corresponde ao enchimento. Quanto mais seco estiver o molde, mais rápida será a absorção da água contida na pasta e conseqüentemente mais rápido será o “endurecimento” da peça no interior do molde. Resultando assim uma maior dificuldade na fase de desmoldagem e proporcionando possíveis deformações na extração da peça.

No final da etapa da secagem, é realizada uma inspeção de forma a assegurar que os moldes se encontram devidamente secos.

➤ **Armazenagem:**

Com os moldes devidamente secos, estes são retirados do interior da estufa, transportados e armazenados, ficando assim à espera que possam integrar novo ciclo de produção das peças cerâmicas. (Sousa, 2017)

1.5 Estado dos consumos Energéticos em Portugal

A indústria na área de produção de cerâmica sanitária requer grandes consumos de energia, sendo que as etapas de secagem são responsáveis por uma grande fatia no que respeita ao consumo energético geral. Posto isto, torna-se importante realizar um levantamento da energia consumida em Portugal e perceber os impactos que estes consumos energéticos têm na sociedade.

Nos dias de hoje torna-se cada vez mais importante a redução dos consumos energéticos, sendo necessário encarar a energia como um fator de produção tão importante como o trabalho, o capital e as matérias primas. (Pilão, 2016)

Caso se consiga reduzir o consumo energético, poderão resultar várias vantagens, como são exemplos o reforço da competitividade das empresas, a redução da fatura energética do país, a redução da intensidade energética da economia, a redução a dependência energética e a redução das emissões de poluentes, como é exemplo os Gases Efeito de Estufa (GEE). (Pilão, 2016)

Um dos principais focos e objetivos da atual política energética nacional é a redução da dependência energética proveniente do exterior, sendo que Portugal apresenta uma dependência elevada, rondando um valor de cerca de 80%. O principal motivo dessa dependência poderá estar relacionado com a inexistência de uma produção nacional de fontes de energias fósseis, de como é exemplo o petróleo ou o gás natural, tendo estes um peso significativo no que diz respeito ao consumo de energia em Portugal. Felizmente, essa dependência tem tido uma tendência a diminuir, sendo que a aposta nas energias Renováveis e na Eficiência Energética poderão ser os principais responsáveis por este decréscimo. Na Figura 1.7 pode-se constatar esse mesmo decréscimo verificado até ao ano de 2014. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

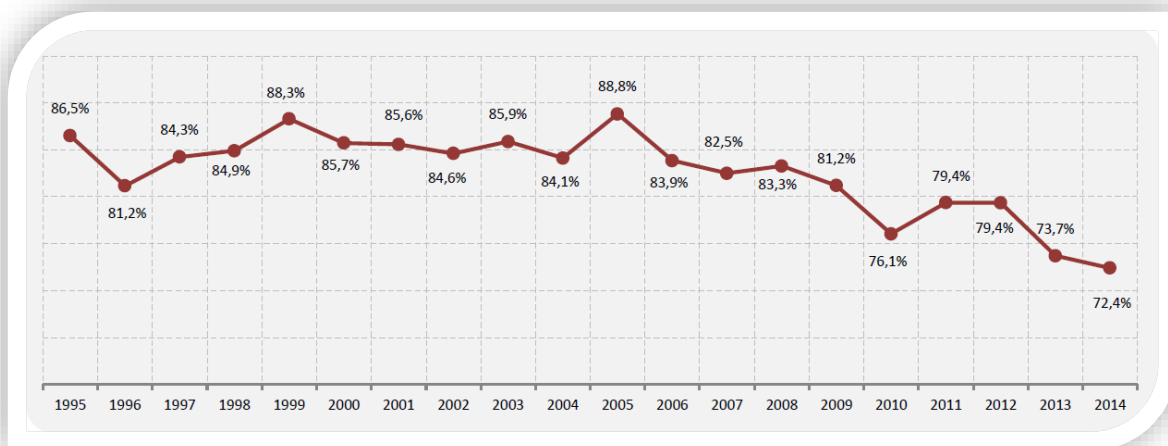


Figura 1.7 - Dependência Energética de Portugal ao longo dos anos. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

Mesmo com este decréscimo, Portugal permanece como o 9º País com a maior dependência energética, encontrando-se bem acima da média da União Europeia (EU-28), como se pode verificar na Figura 1.8. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

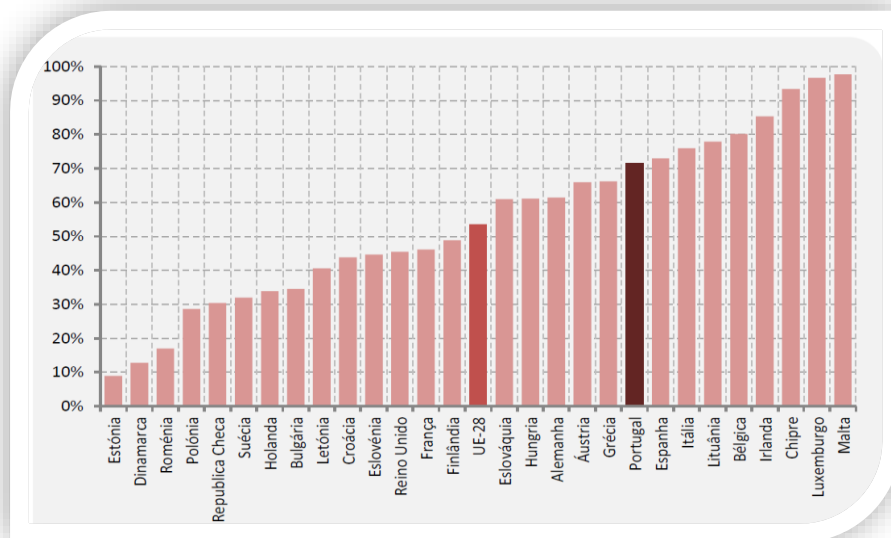


Figura 1.8 - Comparação da Dependência Energética de Portugal com a União Europeia. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

No que diz respeito à Intensidade Energética, Portugal também tem vindo a apresentar uma tendência de diminuição, principalmente no setor de energia primária e energia final. No entanto, comparativamente à União Europeia, Portugal situa-se acima da média no que diz respeito à energia primária, sendo um fator que continua a necessitar de melhorias. Na Figura 1.9 e na Figura 1.10, pode-se verificar o que acabou de ser referido. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

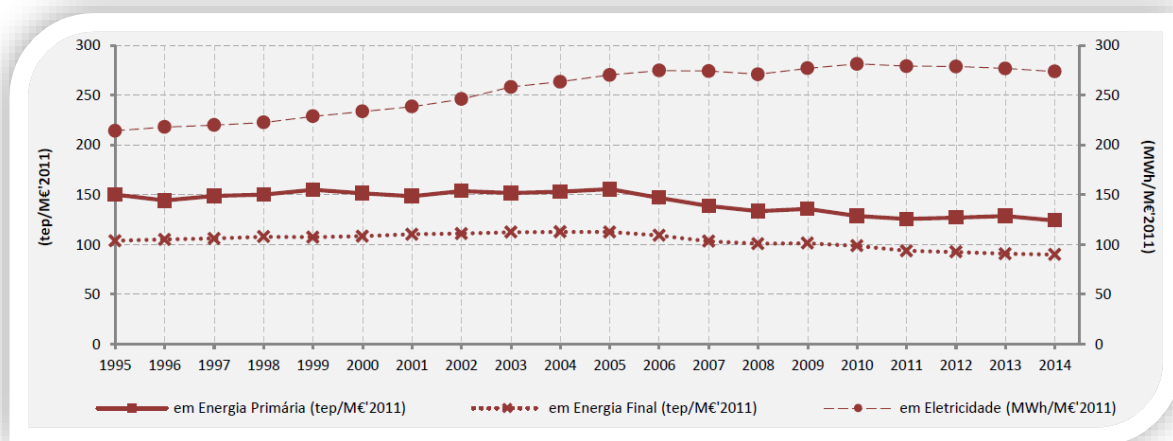


Figura 1.9 - Evolução da Intensidade Energética em Portugal ao longo dos anos. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

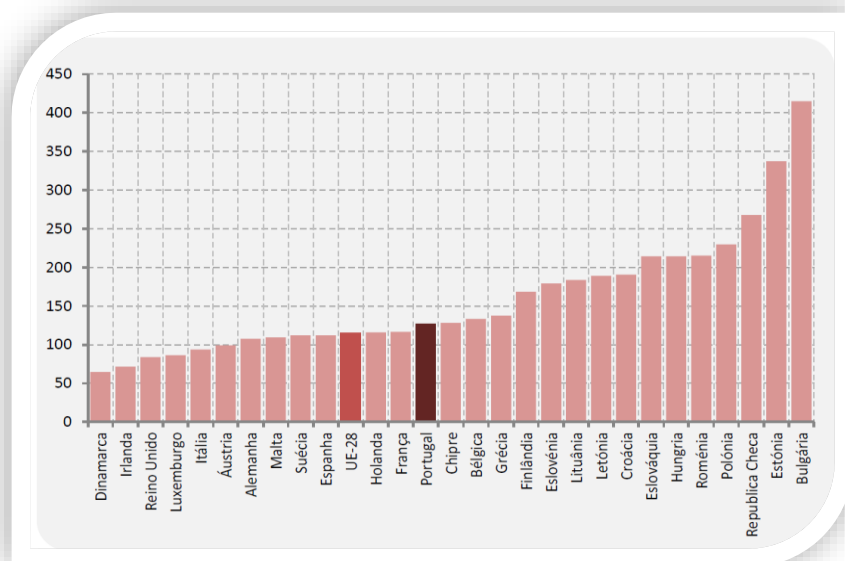


Figura 1.10 - Comparação da Intensidade Energética em Portugal com a União Europeia em (tep/M€). (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

Relativamente às emissões de Gases Efeito de Estufa (GEE), estes têm apresentado o decréscimo mais significativo nos últimos anos, mostrando um total empenho por parte das entidades responsáveis para esse mesmo decréscimo. Na Figura 1.11 pode-se constatar essa evolução de emissões, dando relevância ao setor Energético, responsável por 70% das emissões totais, no ano de 2013. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

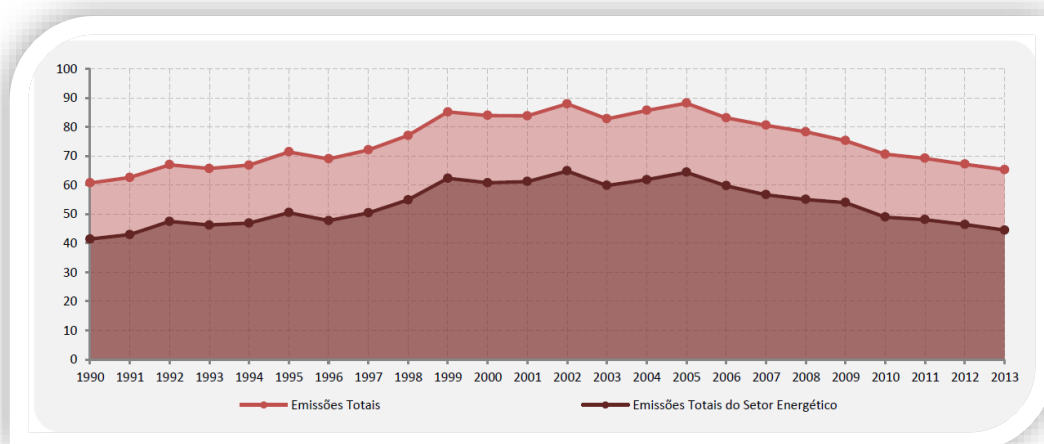


Figura 1.11 - Evolução das emissões dos GEE nos últimos anos em Portugal. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

Comparando as emissões totais de GEE por habitante ao nível da União Europeia, verifica-se que Portugal apresenta um dos valores mais baixos, mostrando valores bem animadores, cerca de 30% abaixo do valor médio, como se pode constatar na Figura 1.12. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

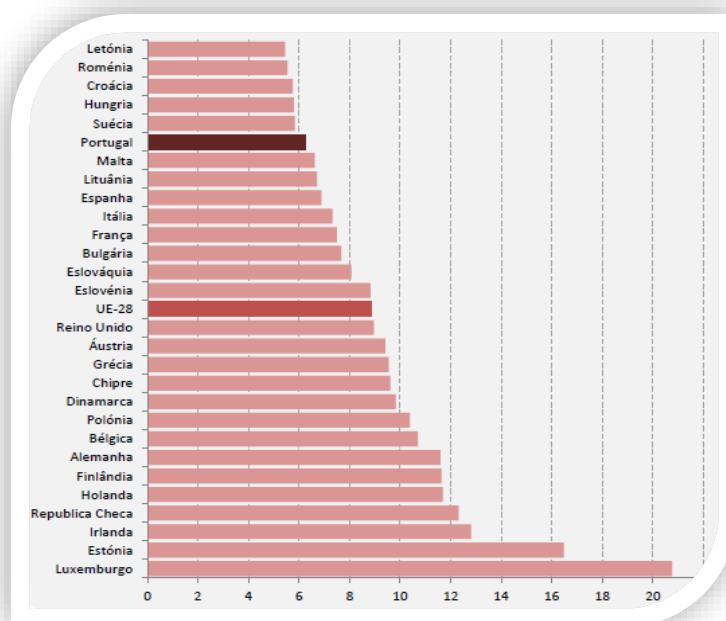


Figura 1.12 - Emissões per capita na União Europeia em 2013 (ton CO₂/habitante). (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

Passando para uma análise do consumo das diferentes fontes de energia, até ao ano de 2014 verifica-se que o petróleo continua a ser a principal fonte de energia primária, correspondendo a uma fatia de 43%, seguindo-se as energias Renováveis (26%) e o Gás Natural (17%). O grande aspeto positivo nesta análise é o fato de existir um decréscimo do peso do petróleo e um aumento das energias renováveis, demonstrando mais uma vez a preocupação existente na diminuição do consumo de energias fósseis. Na Figura 1.13 encontram-se os valores referentes aos consumos das fontes energéticas em teps no ano de 2005 e 2014. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

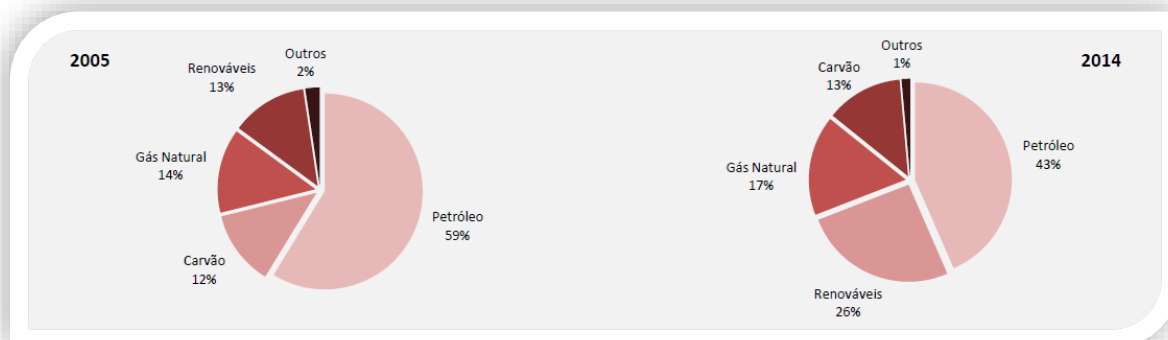


Figura 1.13 - Evolução do Consumo Total de Energia Primária (teps).

No que diz respeito aos principais setores consumidores de energia, o setor dos transportes é o principal consumidor de energia, seguido do setor da indústria, tendo de ser estes os principais visados nas mudanças de hábitos de consumo e racionalização de energia. Na Figura 1.14 é possível visualizar as “fatias” dos principais consumidores de energia, sendo comparados o ano de 2005 e o ano de 2014. (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

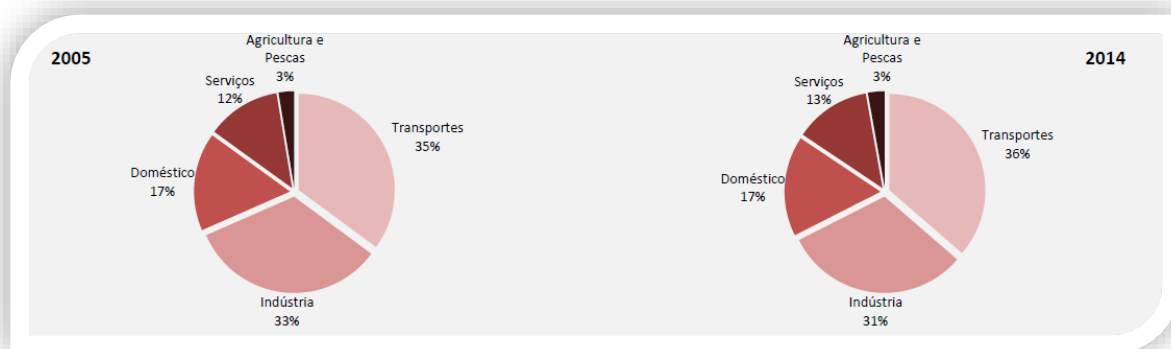


Figura 1.14 - Evolução do Consumo Total de Energia Final por setor de atividade (tep).

Este balanço do consumo de energia em Portugal, mostra que o país segue um caminho correto para atingir as metas estabelecidas e para conseguir um desenvolvimento sustentável. Os principais responsáveis por esse cumprimento de metas devem-se sobretudo à implementação das energias renováveis e da aposta na eficiência energética, visando a preocupação das empresas (no que diz respeito ao setor industrial, onde se insere a empresa em estudo), de adotarem estratégias para uma combinação da redução de consumos com o aumento dos desempenhos energéticos, conseguindo estabelecer um aumento da competitividade empresarial. (Almeida, 2015) (Martins, 2016) (Direção Geral de Energia e Geologia, 2014)

1.6 Enquadramento e Objetivo do trabalho

Como foi referido anteriormente, as etapas de secagem na indústria cerâmica são responsáveis por uma grande parte do consumo energético da própria indústria. Graças à crescente preocupação com a diminuição do consumo energético, tanto pela visão económica da empresa, como pela questão da sustentabilidade, este trabalho tem como principal objetivo uma otimização energética das estufas de secagem dos moldes e das peças cerâmicas, de forma a diminuir o consumo energético das mesmas, reaproveitando ou racionalizando a energia desperdiçada. Para tal, foi traçado um plano

de estratégias a serem estudadas de forma a cumprir com o objetivo. O plano de trabalho passa pelas seguintes etapas:

- Realizar o levantamento energético das estufas relativamente às condições de operação.
- Calcular as perdas associadas às estufas de secagem, realizar um estudo de implementação de um isolamento adequado e a respetiva análise económica.
- Estudo da manipulação da temperatura e humidade no interior das estufas durante os ciclos de secagem de forma a diminuir consumos energéticos de gás natural.
- Estudar a manipulação do tempo de secagem (otimização do tempo) através de um ensaio que acompanha o peso do molde durante o ciclo de secagem.
- Reaproveitamento da energia dos gases de exaustão para outros ciclos de secagem.

1.7 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, sendo apresentado neste 1º capítulo a empresa ARCH Valadares. Faz-se também a descrição do processo de produção das peças cerâmicas e moldes, além do enquadramento energético do setor da cerâmica relativamente ao consumo de energia em Portugal. No 2º capítulo encontram-se os conceitos teóricos do processo de secagem, sendo mencionadas e descritas no 3º capítulo as estufas de secagem. O 4º capítulo refere-se ao levantamento energético das estufas com os respetivos resultados obtidos, sendo que no 5º encontram-se as medidas de otimização estudadas, tendo como finalidade a poupança de energia na secagem dos moldes. Por fim, no 6º capítulo faz-se a análise económica e no 7º capítulo são apresentadas as conclusões obtidas.

2 Processo de Secagem

Neste capítulo procura-se apresentar os conceitos teóricos dos processos de secagem de forma a facilitar a compreensão do trabalho desenvolvido.

2.1 Conceitos Gerais

Um processo de secagem consiste, normalmente, na remoção de água ou outras substâncias (como o benzeno ou solventes orgânicos) de um dado material sólido. O processo de secagem geralmente é utilizado para a remoção de quantidades relativamente baixas de solvente, sendo este removido na forma de vapor usando uma corrente de ar quente. Para o caso de quantidades mais elevadas é utilizado o processo de evaporação em que o solvente é removido na forma de vapor à temperatura de saturação correspondente à pressão de trabalho. (Geankoplis, 1993)

Em alguns casos, o processo de secagem pode ser uma etapa fundamental do processo industrial, sendo que requer muita atenção e cuidado, não só devido ao grande consumo energético a que esta pode estar associada, mas como também no cuidado que se tem de ter para evitar deformações no produto final, como por exemplo o encolhimento e possibilidade de quebra nos materiais cerâmicos. O grande consumo energético está associado à necessidade de fornecimento de energia térmica de forma a aquecer o ar que irá ser responsável pela secagem correspondente à vaporização de água da superfície e do interior dos sólidos. (Geankoplis, 1993)

2.1.1 Conceitos básicos

O teor de humidade de um dado material é normalmente expresso como a massa de líquido contido na unidade de massa de sólido seco, geralmente expressa em base seca, podendo ser calculado como na equação 2.1: (Ribeiro, 2012)

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.1)$$

m – Massa de sólido húmido (kg)

m_s – Massa de sólido seco (kg)

X – Fração de humidade em base seca.

Caso o teor de humidade seja expresso numa base húmida, pode ser representado pela letra W e calculado seguindo a equação 2.2: (Ribeiro, 2012)

$$W = \frac{m - m_s}{m} \quad (2.2)$$

➤ Humidade de equilíbrio

Se um sólido húmido for exposto a uma corrente de gás (normalmente o ar) a uma dada temperatura e humidade, durante um tempo suficientemente longo, o material irá ganhar ou perder água até ser atingido uma condição de equilíbrio. Essa condição de equilíbrio obtida é característica de cada material face às condições do gás a que foi exposto. (Coulson, 2002) (Ribeiro, 2012)

Na Figura 2.1 encontra-se uma representação das curvas de humidade de equilíbrio para diversos materiais em função da humidade da corrente de gás (ar).

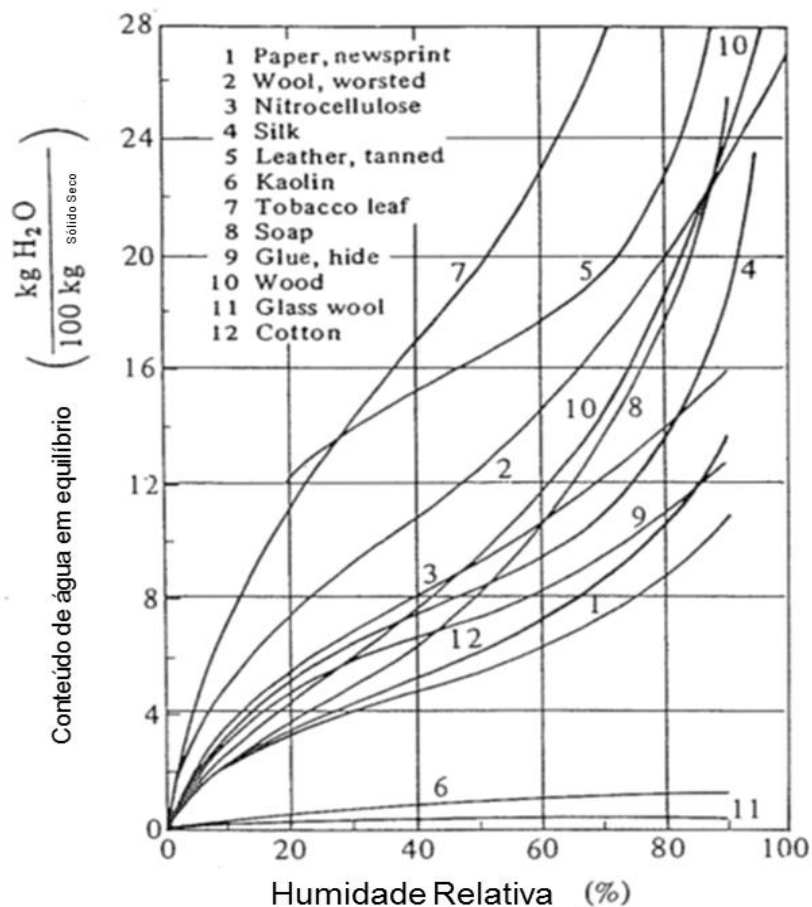


Figura 2.1 - Curvas de Humidade de equilíbrio para diversos materiais, adaptado de (Geankoplis, 1993).

➤ Humidade Livre:

O conceito de humidade livre corresponde à água que se encontra em excesso a partir da humidade de equilíbrio, ou seja, é a diferença entre a humidade do sólido e a humidade de equilíbrio nas condições dadas. Na Figura 2.2 encontra-se uma representação esquemática do cálculo da humidade livre, sendo esta a diferença entre a humidade inicial e a atingida pelo sólido após um contacto suficientemente longo com o ar em determinadas condições mantidas constantes. (Coulson, 2002) (Ribeiro, 2012)

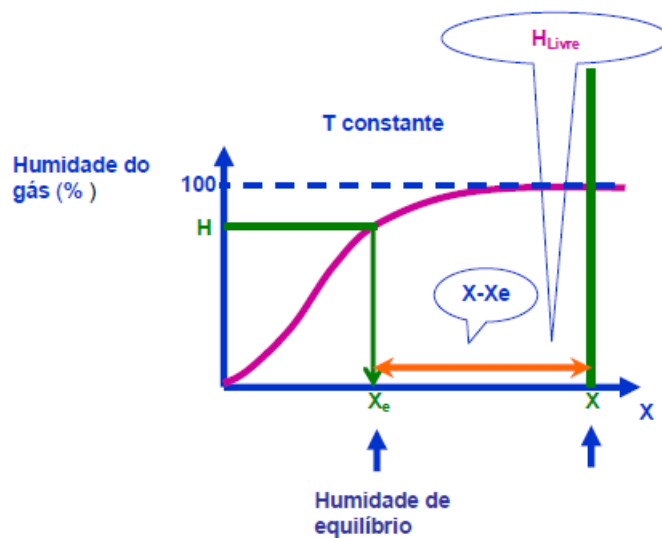


Figura 2.2 - Representação gráfica da humidade livre, adaptado de (Ribeiro, 2012)

➤ Humidade Ligada:

A humidade ligada corresponde à humidade de equilíbrio quando o gás se encontra saturado (X_{100}), e representa a humidade contida no sólido nas diferentes formas: combinada quimicamente; presente em solução líquida no sólido e aprisionada na sua microestrutura em pequenos capilares. Na Figura 2.3 encontra-se uma representação da humidade ligada. (Coulson, 2002) (Ribeiro, 2012)

2.1.2 Carta psicrométrica

A carta psicrométrica consiste basicamente num diagrama de auxílio para consultar as propriedades termodinâmicas de uma mistura de um gás não condensável com vapor de água. Com o conhecimento de apenas duas propriedades, torna-se possível conhecer várias outras, recorrendo à carta psicrométrica. No caso das operações de secagem, esta torna-se muito útil para a caracterização das condições ambientais, onde irá ocorrer a secagem, e de todas as condições do ar que está envolvido nesse processo. Na Figura 2.5 encontra-se representada uma carta psicrométrica para a pressão de 1 atm. (Strobel, 2012) (Sá, 2016)

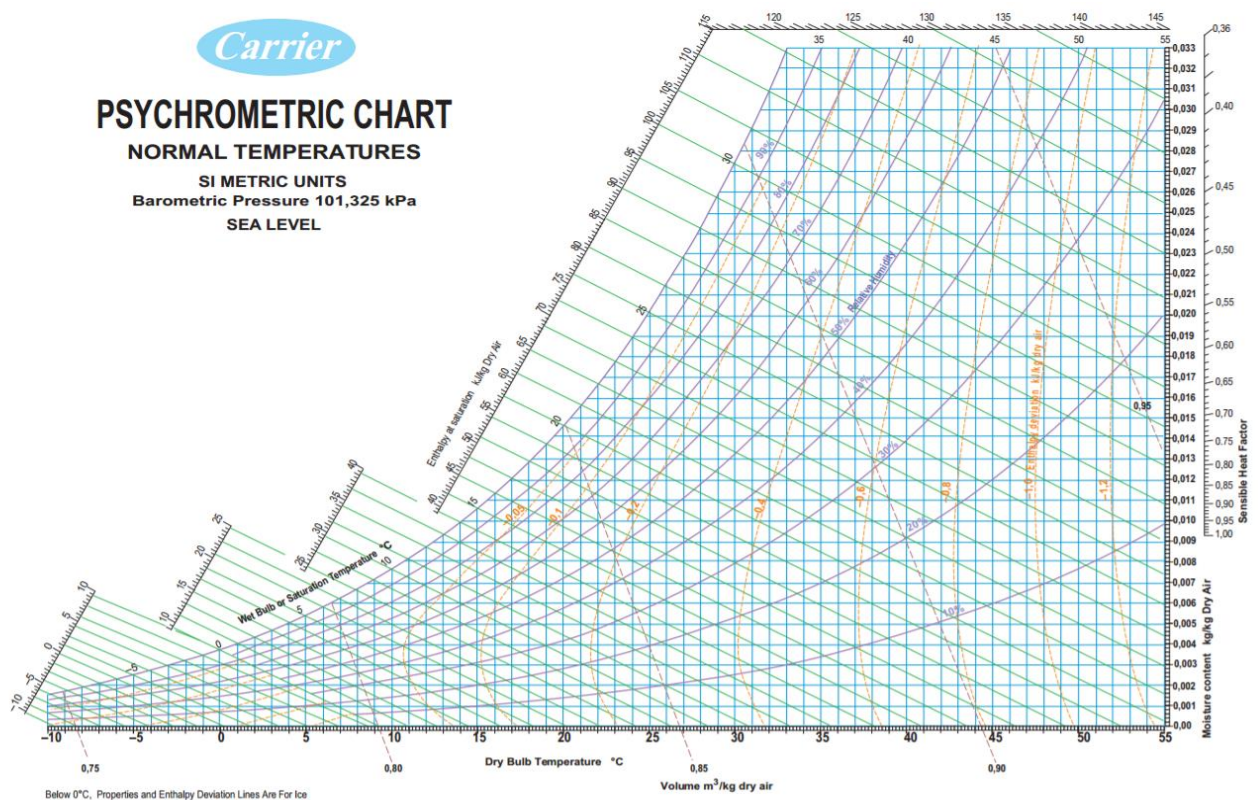


Figura 2.5 - Carta psicrométrica à pressão atmosférica, retirada de (Fenix Tecnico, 2015)

Como já foi referido, na carta psicrométrica é possível consultar várias características termodinâmicas da mistura ar-vapor de água, sendo estas:

- Humidade Específica - X_{esp} , encontra-se no eixo das ordenadas e corresponde à massa de água por massa de ar seco,
- Humidade Relativa - X_R , apresentada em percentagem e corresponde à razão entre a quantidade de vapor de água contida no ar e a quantidade de

vapor que o ar pode conter nas condições de saturação à mesma temperatura,

- Temperatura de Bolbo Seco - T_{bs} , encontra-se no eixo das abcissas e corresponde à temperatura lida por um termómetro convencional,
- Temperatura de Bolbo Húmido - T_h , corresponde à temperatura mais baixa que o ar húmido pode atingir quando é arrefecido apenas devido à evaporação de água,
- Entalpia específica da mistura ar-vapor de água - h , apresenta-se a verde,
- Volume Específico - V_{esp} , indica o volume do ar húmido por unidade de massa de ar seco.

2.1.3 Classificação dos materiais

Do ponto de vista da secagem, os sólidos podem ser classificados como: -Não-Higroscópico poroso-capilar, -Higroscópico-poroso, -Coloidal (não poroso). De seguida, as classificações referidas encontram-se mais detalhadamente explicadas. (Mujumdar, 2014)

- Não-Higroscópico poroso capilar:

Os sólidos que se encontram nesta categoria apresentam espaços porosos facilmente identificáveis. Esse espaço poroso pode encontrar-se preenchido com líquido, caso o material se encontre num ambiente completamente saturado, ou preenchido com ar caso se encontre num ambiente seco. Neste tipo de materiais a quantidade de humidade ligada é insignificante e não apresentam contração durante um processo de secagem. Alguns materiais que se enquadram nesta classificação são as areias, minerais triturados, partículas de polímeros entre outros. (Ibrahim Dincer, 2016) (Mujumdar, 2014) (Zaikov, 2008)

- Higroscópico poroso:

Nesta categoria os materiais apresentam grandes quantidades de humidade ligada, sendo que sofrem contração durante os processos de secagem. Este tipo de materiais pode apresentar uma classificação ainda mais rigorosa, que são os materiais higroscópicos porosos capilares e os severamente higroscópicos. Relativamente aos materiais higroscópicos porosos capilares estes podem apresentar tanto micróporos

como macrósporos como é exemplo a madeira, argila e têxteis. Já os materiais severamente higroscópicos apenas apresentam uma estrutura microporosa, como é exemplo o gel de sílica, aluminas etc. (Mujumdar, 2014)] (Ibrahim Dincer, 2016)

➤ **Materiais coloidais:**

Este tipo de materiais não apresenta qualquer tipo de porosidade, sendo que a água se encontra toda fisicamente ligada e a evaporação apenas é realizada na superfície do material. Alguns exemplos deste tipo de materiais são os sabões, colas e alguns polímeros como o nylon. (Mujumdar, 2014)

2.1.4 Cinética de secagem

➤ **Velocidade de secagem:**

A velocidade de secagem corresponde à massa de líquido evaporado por unidade de tempo e por unidade de área de sólido exposto à secagem, e é representada pela equação 2.3. (Geankoplis, 1993) (Ribeiro, 2012)

$$R = -\frac{m_s}{A} \times \frac{dX}{dt} \quad (2.3)$$

A partir de testes laboratoriais torna-se possível estudar um processo de secagem de um sólido de forma simples. Para tal, basta coloca-lo numa estufa laboratorial em contato com um gás de secagem que mantém a temperatura e humidade constantes ao longo do tempo; medir e registar a evolução da massa do sólido durante o ensaio; calcular e representar graficamente a humidade do sólido ao longo do ensaio (Figura 2.6 a); e por fim, calcular e representar graficamente a velocidade de secagem do sólido em função da humidade do sólido (Figura 2.6 b). (Geankoplis, 1993)

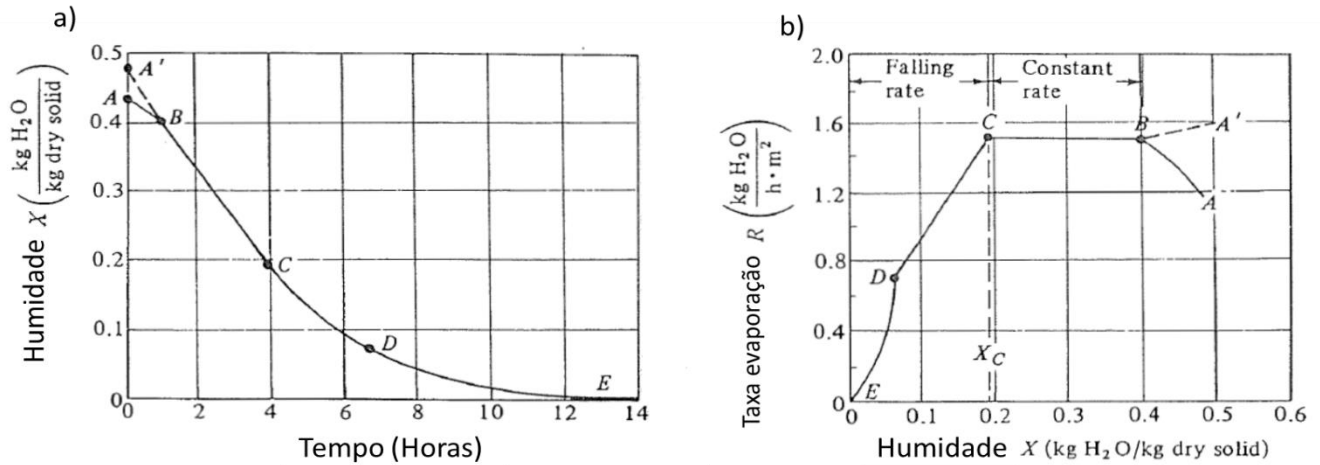


Figura 2.6 - a) Representação gráfica da humidade do sólido ao longo do ensaio, b) Representação gráfica da velocidade de secagem do sólido em função da humidade, adaptado de (Geankoplis, 1993)

- Período inicial de secagem (AB ou A'B):

Sempre que a temperatura do sólido é diferente da temperatura do gás junto à interface, a velocidade de evaporação pode diminuir ou aumentar de acordo com a relação entre a temperatura inicial do sólido e a temperatura do gás. (Ribeiro, 2012)

A: Se $T_{\text{inicial sólido}} > T_{\text{equilíbrio}}$ e A': Se $T_{\text{inicial sólido}} < T_{\text{equilíbrio}}$

- Período de velocidade de secagem constante (BC):

No período de velocidade de secagem constante, a superfície do sólido encontra-se inicialmente muito molhada e existe um filme de água contínuo na superfície a secar. Durante este período, todo o calor fornecido ao sólido será aplicado apenas na evaporação desse filme. Caso seja um sólido poroso, a maioria da água evaporada neste período é reposta pela água proveniente do interior do mesmo, sendo assim a velocidade de secagem constante enquanto a velocidade de migração da água proveniente do interior é igual à da evaporação.

Ao atingir o ponto C, o sólido encontrar-se-á na sua humidade crítica. Assim sendo, este ponto (humidade crítica) assinala a situação em que a água superficial é insuficiente para manter o filme contínuo que se encontra a cobrir a área de secagem. Importante será referir que a humidade crítica não deve ser confundida com a humidade de equilíbrio para o sólido em contato com o ar saturado. A humidade crítica ocorre em situações de não equilíbrio e depende apenas das condições de secagem, não sendo uma propriedade do material. (Geankoplis, 1993) (Coulson, 2002) (Ribeiro, 2012)

- Período de velocidade de secagem descendente:

- 1º Período (CD)

Ao atingir o ponto crítico (ponto C), deixa então de existir água suficiente para produzir um filme contínuo, ou seja, a superfície do sólido deixa de estar completamente molhada, ficando continuamente mais seca ao longo deste primeiro período de velocidade de secagem decrescente. Quando o ponto D é atingido, a superfície do sólido já se encontra completamente seca. (Geankoplis, 1993)

- 2º Período (DE)

No ponto D, em que a superfície do sólido já se encontra seca, a humidade restante no interior movimenta-se até à superfície do sólido pelo mecanismo de difusão molecular ou por escoamento capilar. Ao chegar ao ponto E, atinge-se a humidade de equilíbrio do sólido para as condições do gás. A quantidade de humidade a ser removida do sólido em todo este período de velocidade descendente (CE) pode ser relativamente baixa, mas o tempo requerido para o fazer é mais longo como se pode comprovar na Figura 2.6 a). Essa diferença de velocidades pode ser explicada pelo facto de a velocidade de evaporação ser relativamente alta, graças à baixa resistência existente, comparativamente à resistência correspondente à difusividade no interior do sólido. (Geankoplis, 1993) (Ribeiro, 2012) (Coulson, 2002)

- Tempo de secagem:

Se um dado material for seco com a passagem de ar quente na sua superfície que se encontra inicialmente molhada, a taxa da curva de secagem na sua forma mais simples poderá ser representada como na Figura 2.7:

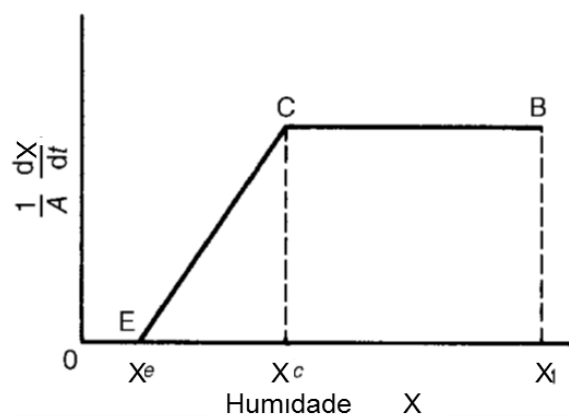


Figura 2.7 - Representação gráfica da taxa da curva de secagem simplificada, adaptada de (Coulson, 2002)

O cálculo do tempo de secagem, para um dado sólido, pode ser obtido com o auxílio das curvas de secagem obtidas experimentalmente para o sólido em questão. A partir da equação 2.3, pode-se obter a equação 2.4.

$$t_s = -\frac{m_s}{A} \times \int_{X_i}^{X_f} \frac{dX}{R} \quad (2.4)$$

Em que,

t_s = tempo de secagem

X_i = Humidade inicial do sólido

X_f = Humidade final do sólido

Para o caso do tempo de secagem durante o período de velocidade constante, este pode ser obtido pela equação 2.5:

$$t_c = -\frac{m_s}{A \times R_c} \times (X_c - X_1) \quad (2.5)$$

Em que,

t_c = Tempo de secagem a velocidade constante

X_1 = Humidade inicial do sólido

X_c = Humidade crítica do sólido

R_c = Velocidade de secagem constante

No caso do tempo de secagem para o primeiro período de velocidade decrescente, se for considerada uma variação linear de R com X, pela integração da equação 2.4 obtém-se a equação 2.6. (Ribeiro, 2012)

$$t_{s1} = \frac{m_s(X_c - X_2)}{A \times (R_1 - R_2)} \times \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.6)$$

Em que,

t_{s1} = Tempo de secagem no primeiro período de velocidade decrescente

X_2 = Humidade do sólido no fim do primeiro período de velocidade decrescente.

R_1 = Velocidade de secagem no início do primeiro período de velocidade decrescente.

R_2 = Velocidade de secagem no fim do primeiro período de velocidade decrescente.

2.1.5 Curva de Bigot

Como já foi referido anteriormente, a contração dos sólidos nos processos de secagem pode-se tornar um parâmetro significativo, ganhando uma preocupação relevante para determinados materiais, pois pode vir a trazer deformações significativas no sólido seco. De forma a acompanhar essa contração/encolhimento de um dado material, utiliza-se a curva de Bigot. Esta curva basicamente relaciona a contração com a humidade do material, apresentando diferentes fases ao longo do processo de secagem. Na Figura 2.8 está representada uma curva de Bigot característica.

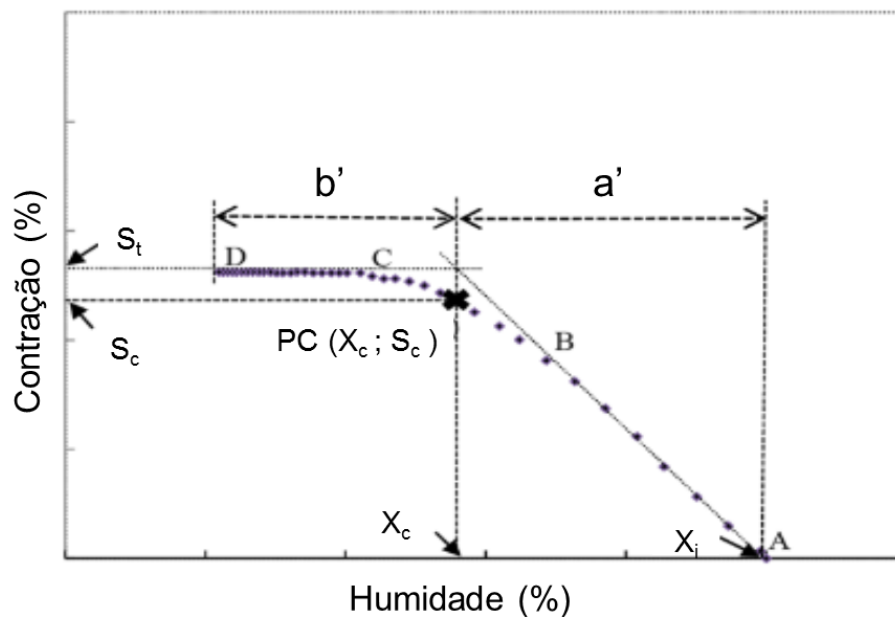


Figura 2.8 - Exemplo de uma curva de Bigot característica.

Como se pode verificar na Figura 2.8, a fase inicial de secagem associa uma grande contração com a perda de água por parte do material, sendo esta fase correspondente à fase do período de velocidade de secagem constante (a'), já referido anteriormente. Com a evolução da secagem, atinge-se o ponto crítico, sendo este facilmente detetado na curva de Bigot visto que separa a fase de velocidade constante (a') da fase de período de secagem descendente (b'). Nesta ultima fase, a taxa de contração irá tender a diminuir, acabando mesmo por se tornar nula.

A curva de Bigot definida para um dado material, vem ajudar a estabelecer um ciclo de secagem mais adequado para o material em questão, estando a otimização dos consumos energéticos e a otimização do tempo de secagem associados a este processo. (Mujumdar, 2014) (Melo, 1979) (Vieira, 2000)

2.2 Equipamentos de secagem

Devido à grande variedade de design de secadores existentes, a sua classificação e escolha torna-se uma tarefa difícil, sendo que gradualmente foram-se desenvolvendo técnicas de forma a seleccionar o melhor tipo de secador para um determinado processo/produto. Provavelmente, uma das mais completas classificações já realizadas foi a de K. Kröll, que apresentou um sistema baseado nos seguintes fatores: (Coulson, 2002)

- a) Temperatura e pressão no secador,
- b) Método de aquecimento,
- c) Meios em que material húmido é transportado pelo secador,
- d) Qualquer adição mecânica de forma a melhorar o desempenho do secador,
- e) Forma como o ar circula,
- f) Forma como o material húmido é suportado,
- g) Calor médio,
- h) Natureza da alimentação húmida e como é introduzida no secador.

Após a seleção de um grupo de secadores, a escolha do secador mais conveniente para o processo passa ainda pela avaliação de como será a melhor utilização do mesmo, se em processo contínuo ou descontínuo. Por vezes, essa escolha é imposta pelo tipo de material a ser secado ou pela forma como é efetuado o aquecimento: contato com uma superfície de um sólido quente ou diretamente por convecção e radiação. (Coulson, 2002)

Geralmente, um processo de secagem contínua é sempre preferível a implementar num processo industrial de maiores dimensões, devido a estar associado a um menor custo de operação/secagem. No entanto, com a diminuição do fluxo de materiais a serem secos, os custos associados a este processo tendem a aumentar, o que torna a opção de processos descontínuos mais rentáveis e atrativos na hora de escolha, como é possível verificar na Figura 2.9. (Coulson, 2002)

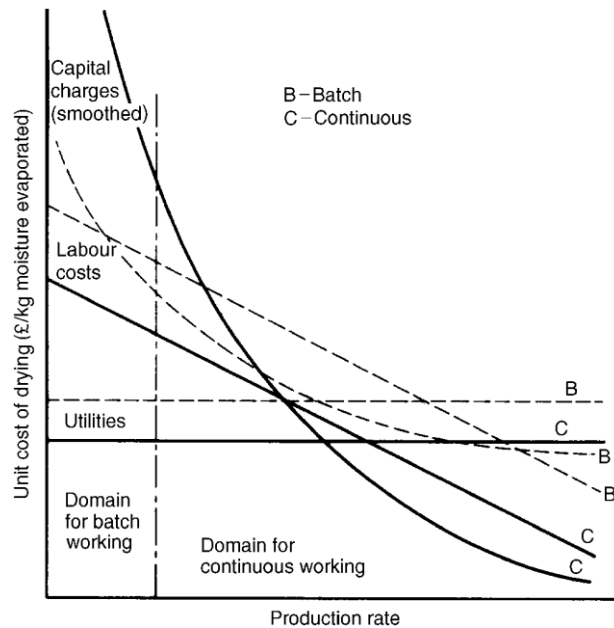


Figura 2.9 - Relação entre os custos de operação, taxa de produção e tipo de secagem, adaptado de (Coulson, 2002)

A implementação/construção de um secador descontínuo torna-se muito menos dispendiosa do que a de um secador contínuo, além de ser mais versátil e poder ser usado para diferentes materiais. Outro fator relevante para a escolha do processo descontínuo é o facto de a temperatura e humidade serem facilmente controladas durante o processo de secagem, sendo esse fator muito importante no caso da secagem de materiais que requerem um controlo de humidade ao longo do tempo. (Coulson, 2002)

2.2.1 Equipamentos mais utilizados

Como já foi referido anteriormente, existe uma grande variedade de tipos de secadores, sendo que a sua escolha deve ser feita através de um ideal enquadramento com o processo, característica do material a ser seco e respetiva quantidade. Os tipos de secadores mais utilizados industrialmente são: (Coulson, 2002)

- Secador de tabuleiros
- Secador de túnel
- Secador rotativos
- Secador de tambor
- Secador por pulverização

- Secador pneumático
- Secador de leito fluidizado

No presente trabalho, a secagem no processo de fabrico da empresa é efetuada em estufas de secagem que podem ser denominadas por secadores de tabuleiros. Isto pode ser considerado uma vez que é um processo descontínuo em que as peças cerâmicas/moldes são introduzidas no interior do secador apoiados em tabuleiros, sendo o ar forçado a passar pelas peças de forma a seca-las.

3 Estufas de Secagem

Como já foi referido anteriormente, na sequência de produção das peças cerâmicas é necessário recorrer à secagem das peças e moldes nas Estufas de Secagem. Estas estufas são o alvo de estudo deste trabalho, sendo que para poder realizar um levantamento energético e tentar otimizar o processo, torna-se necessário conhecer e perceber pormenorizadamente todo o seu funcionamento.

Para esse efeito, neste capítulo é feita uma descrição do modo de funcionamento e das características técnicas referentes às estufas de secagens, presentes na unidade industrial da empresa.

3.1 Descrição e Funcionamento das estufas

Nas instalações industriais encontram-se cinco estufas de secagem individuais, sendo que todas estas operam de forma independente uma das outras com o intuito de oferecer uma boa eficiência energética e flexibilidade de operação, e todas se encontram equipadas com sistemas de controlo de processo automático, equipamentos de circulação de ar, sistemas de aquecimento e sistemas de exaustão. Deste modo as utilidades energéticas consumidas no processo de secagem são:

- Gás Natural
- Energia Elétrica

As estufas de secagem funcionam por um processo descontínuo, podendo ser consideradas como secadores de tabuleiros.

As estufas podem ser utilizadas para duas diferenciações de carga, os moldes e as peças cerâmicas, estando as peças cerâmicas compreendidas na fase do processo da secagem branca. Na grande maioria dos ciclos de secagem, os tipos de carga (moldes e peças) não são misturadas, uma vez que possuem tempos de permanência nas estufas bastante distintos, bem como condições de operação, sendo que por vezes, para alguns casos eventuais, possam ser introduzidas algumas peças cerâmicas num ciclo de secagem de moldes por um curto período de tempo.

No caso de um ciclo de secagem em que a carga seja constituída por moldes, as estufas apenas dão início ao ciclo se estas se encontrarem devidamente cheias, sendo que para encher são necessários cerca de 56 moldes, podendo este número variar conforme as dimensões dos moldes.

Como já foi referido anteriormente, a secagem de moldes e peças cerâmicas corresponde a tempos e condições de operação diferentes, e por essa razão foram elaborados pela empresa Thermic Designs dois programas distintos para a operação

das estufas. No caso dos moldes a duração do ciclo de secagem corresponde a cerca de 175 horas. Para a secagem das peças cerâmicas, o tempo do ciclo é de cerca de 8 horas. Esses programas foram devidamente estudados e pré-definidos para que a secagem seja efetuada de uma forma branda e eficiente sem que possa comprometer as características físicas e químicas das cargas. (Thermic Designs Ltd, 1992)

Seguidamente são apresentadas todas as etapas e equipamentos relativamente às estufas existentes na empresa.

➤ Circulação do ar:

De forma a fornecer o ar de secagem, tanto para o queimador (onde o ar é aquecido) como para o interior da estufa, é utilizado um ventilador, cuja capacidade é de cerca de 10000 m³/h, utilizando um motor de 3,00 kW, 380 V. Este ventilador encontra-se instalado juntamente com uma conduta (à saída do queimador) de forma a inserir o ar no interior da estufa. Na Figura 3.1 encontra-se representado a conduta de inserção do ar na estufa, com uma visão lateral, e o esquema de montagem do conjunto ventilador/queimador juntamente com a conduta de fornecimento de ar quente, visto de cima. (Thermic Designs Ltd, 1992)

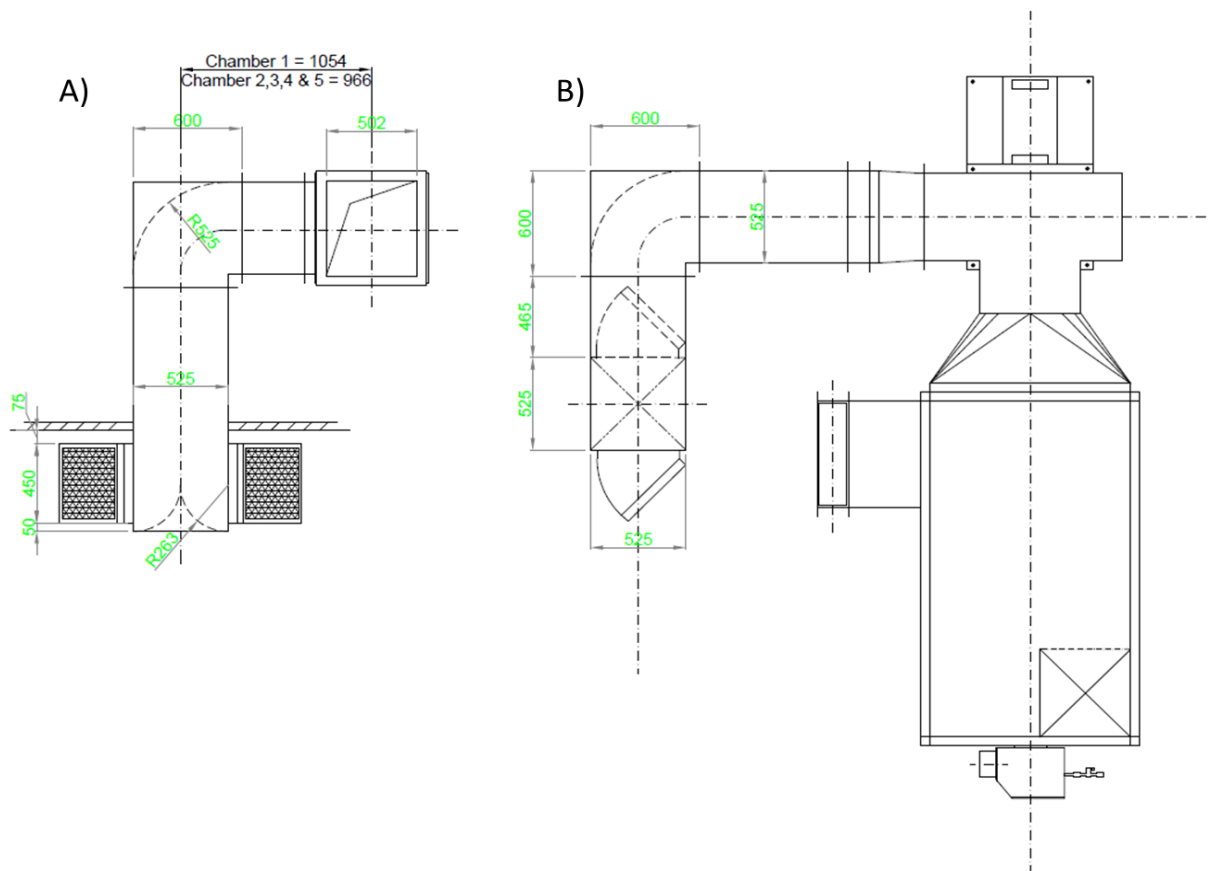


Figura 3.1 - Representação da conduta de ar quente, A) e do conjunto conduta/ventilador/queimador, B).

De forma a providenciar jatos de ar nos moldes e peças cerâmicas, e assegurar que toda a superfície está sujeita à corrente de ar de secagem, cada estufa encontra-se equipada com dois “Dryflex”, que consistem em estruturas cónicas equipadas com um ventilador de forma a garantir a circulação do ar no interior das mesmas. Cada “Dryflex” possui uma capacidade de recirculação de 24 000 m³/h, contendo aberturas laterais, e um motor com rotação de 2,4 rpm, com o objetivo de aumentar a eficiência da secagem. O motor que providência essa rotação tem uma potencia de 0,125 kW, já o motor de ventilação consome 3,00 kW. Na Figura 3.3 é possível visualizar o esquema estrutural de cada “Dryflex” em diferentes perspetivas. (Thermic Designs Ltd, 1992)

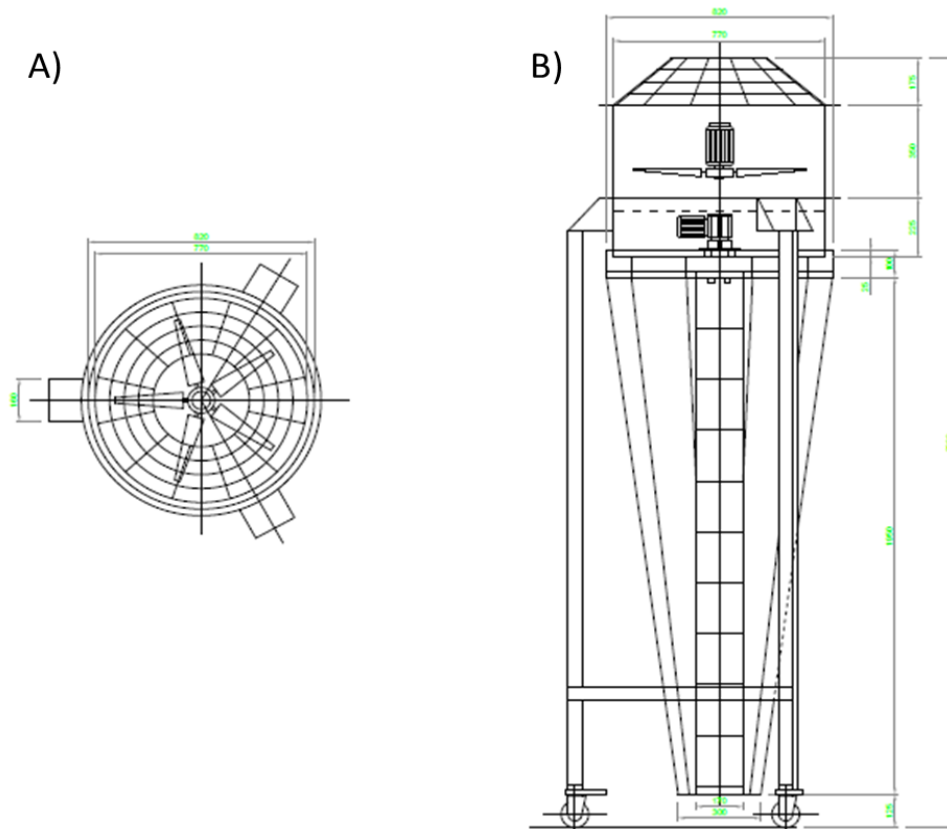


Figura 3.3 - Representação dos circuladores de ar "Dryflex", em que A) corresponde a vista de cima e B) vista lateral.

➤ Queimador:

O fornecimento de energia ao ar de secagem (produção de ar quente) é assegurado por um “Direct Fired gás burner”, estando este equipamento presente em cada estufa de secagem. Este tipo de queimador utiliza como combustível gás natural, em que o tamanho da chama produzida é manipulado consoante a temperatura desejada no interior da câmara, que é estabelecida pelo programa implementado. Em cada queimador existe uma câmara de mistura comum, onde o ar a ser aquecido e a chama produzida se encontram em contato direto. O ar quente e os gases de combustão são inseridos já misturados no interior da estufa, através do ventilador. Cada queimador possui uma entrada para a recirculação do ar, sendo que o ar no interior da estufa poderá ser novamente aquecido, nova passagem pelo queimador, de forma a reutilizar parte da energia o que conduz a uma menor necessidade de ar fresco. Na Figura 3.4 encontra-se um esquema representativo do conjunto ventilador/queimador, sendo a imagem mais acima uma vista de cima e a mais abaixo uma vista lateral. (Thermic Designs Ltd, 1992)

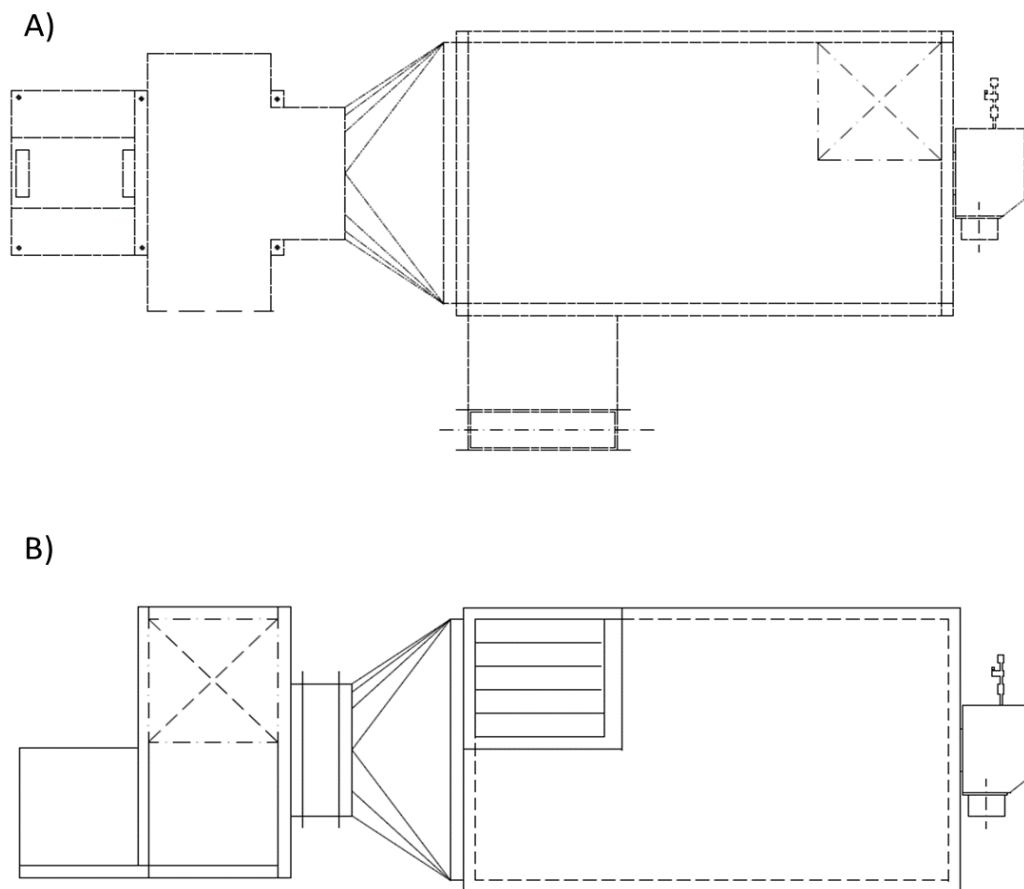


Figura 3.4 - Representação do conjunto ventilador/queimador em duas perspectivas, sendo a A) uma vista de cima e a B) uma vista lateral.

➤ Controlo da temperatura:

Cada estufa está ligada a um painel de controlo de forma a controlar as condições de operação desejadas. De forma a controlar a temperatura, cada painel está equipado com um programa baseado num microprocessador de forma a obter um período de “rampa”, que corresponde a um aumento gradual da temperatura, e outro de permanência, que mantém a temperatura constante. Para isso utiliza-se um detetor de resistência de lâmpada de platina, de forma a transmitir a temperatura interna da estufa ao programador, que por sua vez manipula a válvula de controlo do queimador, variando o tamanho da chama e como consequência a temperatura no interior da estufa, conduzindo ao set-point estipulado pelo programa de secagem. Este controlo rigoroso da temperatura é considerado muito importante, pois caso os moldes sejam sujeitos a temperaturas demasiado elevadas, estas poderão por em risco a integridade do material. Na Figura 3.5 encontra-se representada a variação da temperatura ao longo do tempo para a secagem de moldes. (Thermic Designs Ltd, 1992)

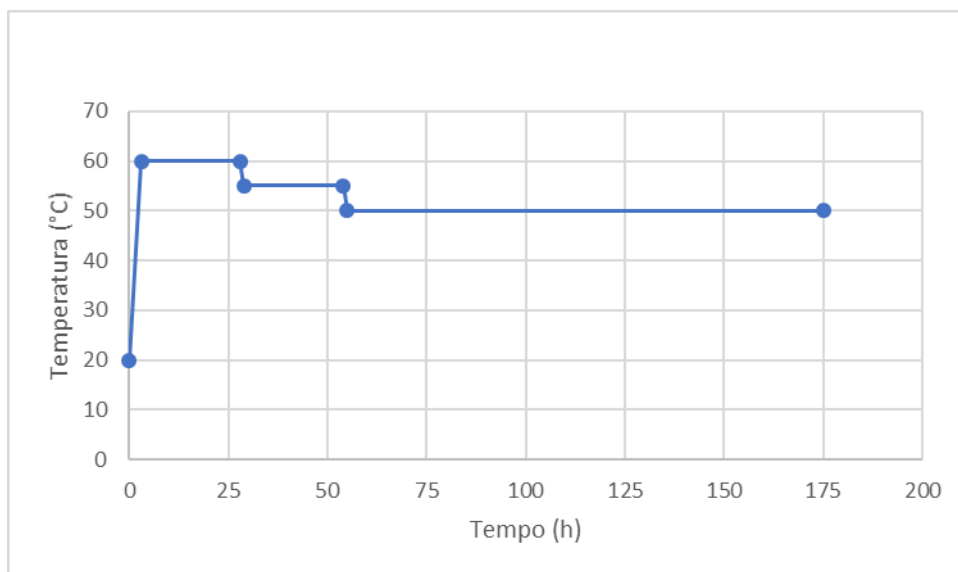


Figura 3.5 - Curva da temperatura estabelecida pelo programa para a secagem de moldes.

➤ Controlo da humidade:

O controlo da humidade do ar no interior da estufa é assegurado pela inserção de ar fresco e simultaneamente pela exaustão do mesmo volume de ar húmido. As condições de set-point requeridas durante cada ciclo de secagem são estipuladas pelo programador de controlo.

Durante o ciclo de secagem, as existências de “persianas” automáticas, tanto nas condutas de fornecimento de ar fresco como nas condutas de exaustão, são responsáveis pela modulação das condições de humidade do ar no interior das estufas. Para tal, cada persiana contém um pequeno motor de forma a manipular o ângulo de abertura consoante as necessidades de ar. Quando a humidade relativa interna do ar atinge um determinado valor de set-point definido pelo programa, as persianas são devidamente abertas de forma a introduzir ar fresco e a realizar a exaustão do ar húmido, estabilizando assim as condições pretendidas e definidas pelo programador.

No caso de um ciclo, onde exista uma baixa taxa de evaporação (quantidade da carga é baixa) e o set-point mínimo de humidade é atingido, as persianas de exaustão e de admissão de ar fresco são automaticamente fechadas, assegurando assim o aumento da humidade interna.

Este controlo rigoroso da humidade é geralmente efetuado de forma a evitar que os moldes e as peças tenham uma velocidade de secagem muito elevada. Caso isso aconteça poderá ocorrer um fechamento dos poros à superfície dos moldes/peças, impedindo a migração da água do interior para o exterior. Deste modo, a secagem será deficiente, proporcionando deformações e fazendo com que as peças fiquem mais suscetíveis a quebras. Na Figura 3.6 encontra-se representado a curva da humidade estabelecida pelo programa para a secagem de moldes. (Thermic Designs Ltd, 1992)

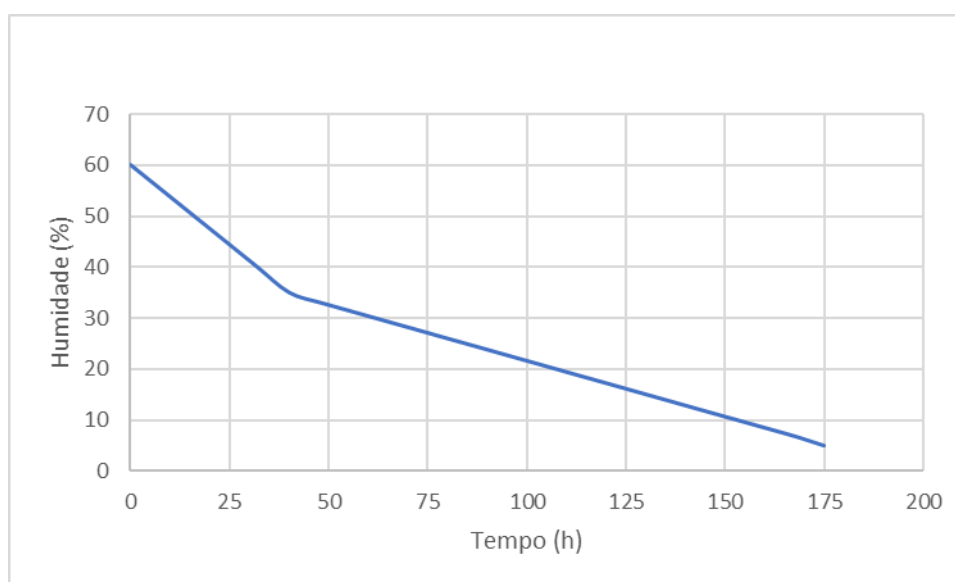


Figura 3.6 - Curva da humidade estabelecida pelo programa para a secagem de moldes.

Atualmente, apesar da existência dos controladores de humidade para cada estufa de secagem, estes não se encontram em utilização, sendo apenas utilizado o controlo da temperatura no interior da estufa. Para esse efeito, as persianas responsáveis pelo

controlo de caudal de ar fresco e de exaustão encontram-se total e constantemente abertas durante todo o ciclo de secagem, renovando constantemente o ar no seu interior. Este fator, embora não se tenha verificado interferência na qualidade do produto obtido, poderá ter efeitos económicos indesejáveis.

3.2 Dimensões e desenhos técnicos

Neste subcapítulo encontram-se representadas as dimensões relevantes das estufas de secagem e dos desenhos técnicos para uma melhor visualização e perceção das mesmas. Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** encontram-se as dimensões das estufas de secagem presentes na ARCH Valadares, sendo que estes dados servirão de auxílio para futuros cálculos na realização do levantamento energético.

Tabela 3.1 - Dimensões referentes às estufas de secagem.

Dimensões	Estufa 1	Estufa 2,3,4 e 5
Comprimento (m)	6,095	6,270
Largura (m)	4,495	4,470
Comprimento Porta (m)	3,580	3,580
Altura câmara(m)	4,000	4,000
Altura Queim. (m)	2,000	2,000
Altura Porta (m)	3,000	3,000
Espessura Paredes (m)	0,300	0,300
Espessura Paredes Este/Oeste	-	0,085
Espessura Parede Este (m)	-	0,085
Espessura Parede Oeste (m)	-	0,085
Espessura Teto (m)	0,040	0,040
Espessura Porta (m)	0,040	0,040
Área Teto (m²)	27,397	28,027
Área Parede Norte (m²)	17,980	17,880
Área Parede Oeste/Este (m²)	24,380	25,080
Área Porta (m²)	10,740	10,740
Volume Câmara (m³)	109,588	112,108

Na Figura 3.7 e na Figura 3.8 pode-se visualizar os desenhos técnicos das estufas de secagem, sendo que a Figura 3.7 corresponde a uma vista seccional de uma das estufas e a Figura 3.8 corresponde a uma vista de cima de todas as cinco estufas presentes na fábrica.

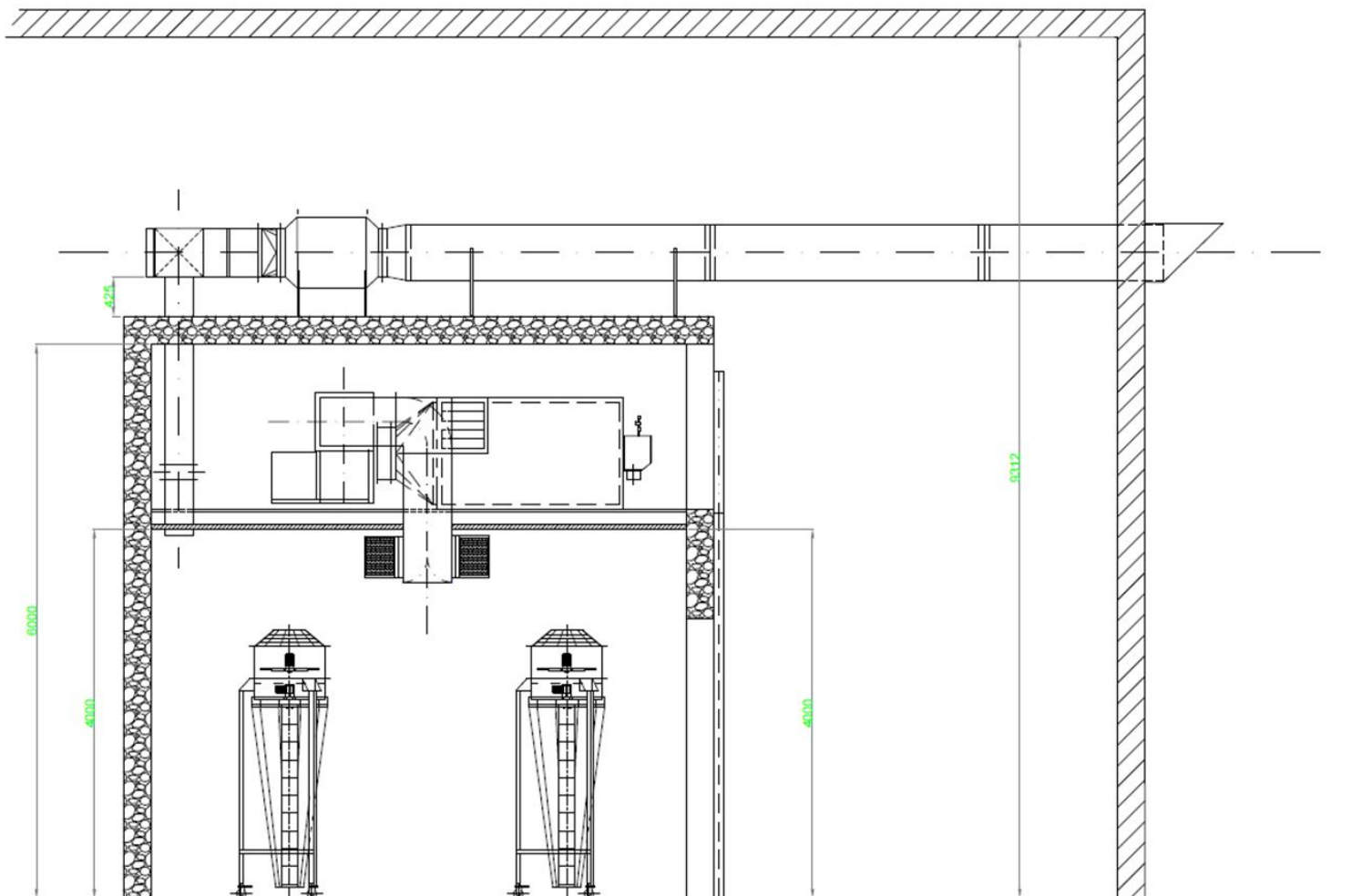


Figura 3.7 - Representação seccional de uma estufa de secagem.

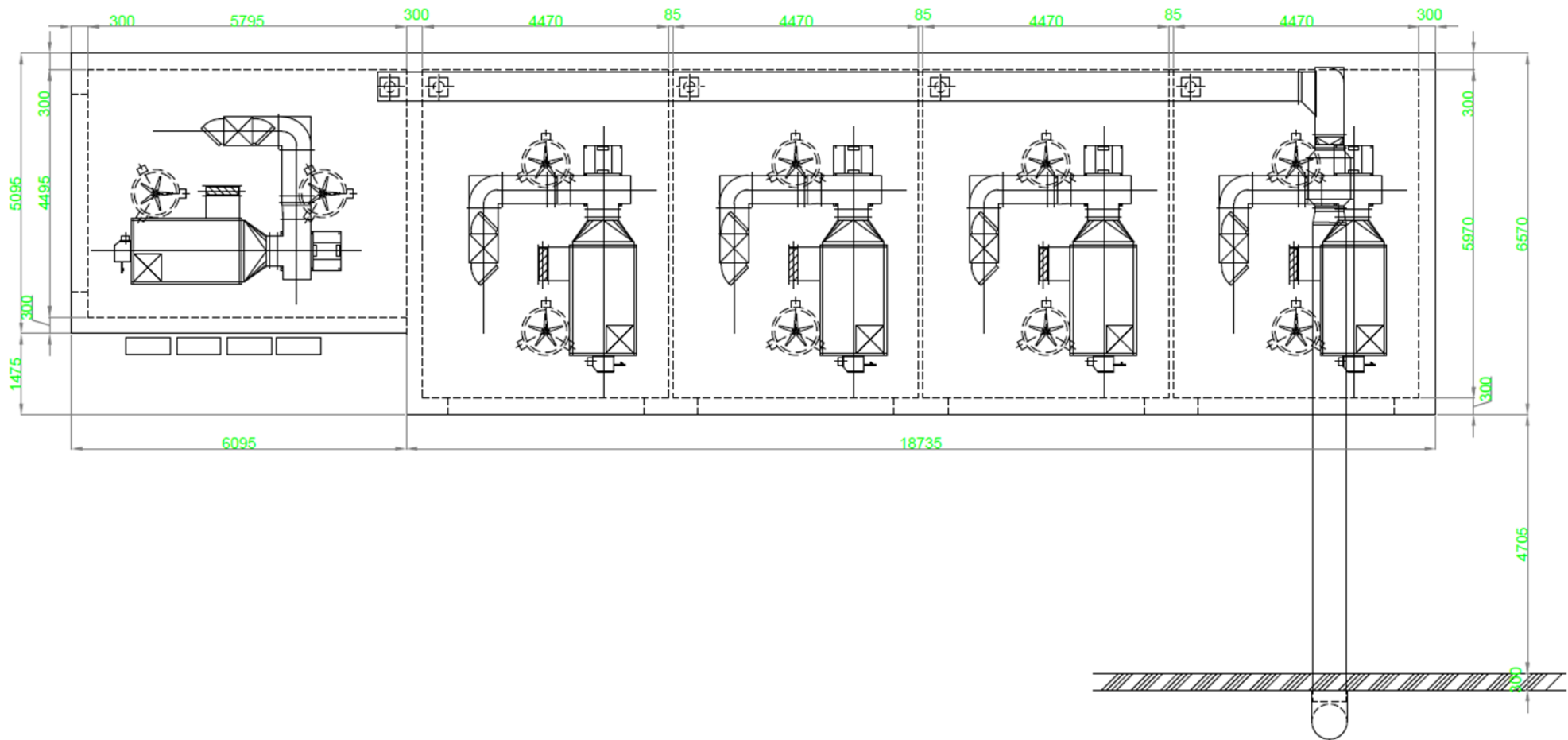


Figura 3.8 - Representação das cinco estufas de secagem com uma visão superior.

4 Análise energética às estufas de secagem

Como já foi referido anteriormente, para a concretização deste trabalho – otimização energética das estufas de secagem utilizadas para secar moldes em gesso e peças cerâmicas - foi necessário fazer um levantamento energético às mesmas. Neste capítulo estão descritos todos os métodos, ensaios e balanços utilizados de forma a realizar a otimização das estufas. Estes levantamentos foram realizados na estufa nº2 e consideraram-se iguais para as restantes estufas, devido a existir apenas uma diferença insignificante na dimensão das mesmas e todas serem sujeitas às mesmas condições de operação.

4.1 Levantamento Energético das Estufas

Para a concretização do levantamento energético foi necessário estipular uma estratégia de forma a realizar ensaios que permitam adquirir todos os dados relevantes para os cálculos necessários. Essa estratégia estipulada foi necessária devido à inexistência de qualquer levantamento energético nem base de dados na empresa relativamente à gestão de energia das estufas de secagem.

Na Figura 4.1 é possível visualizar um esquema simplificado do sistema de secagem com todas as correntes de entrada e saída devidamente identificados e que são relevantes para a análise energética.

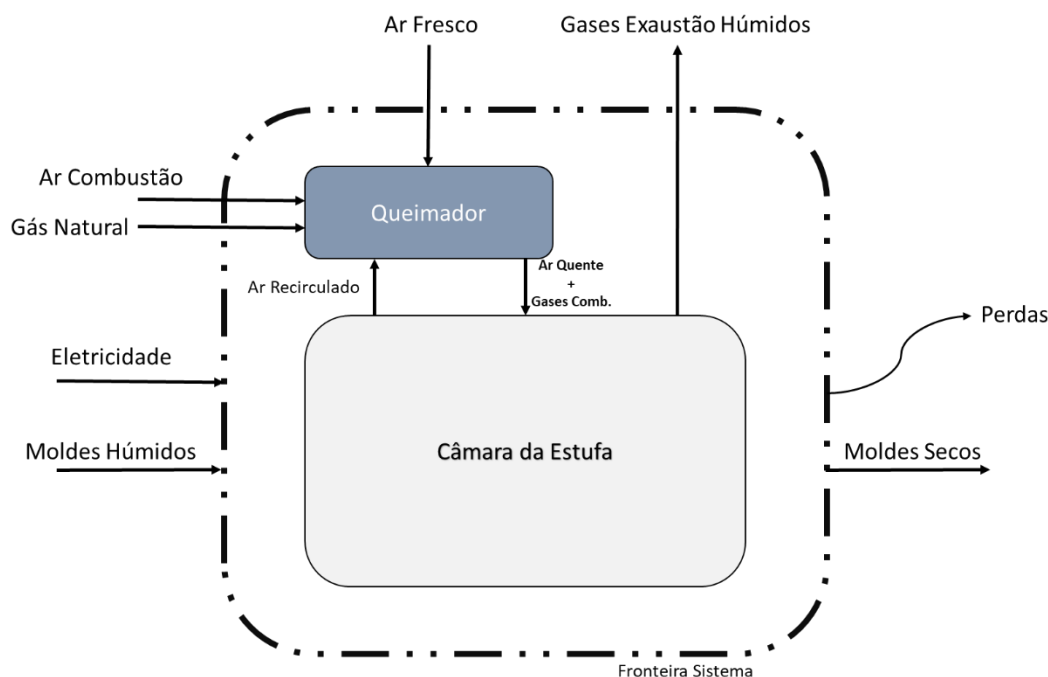


Figura 4.1 - Esquema simplificado do sistema de secagem.

De uma forma simplificada, e para uma melhor compreensão da Figura 4.1, o aquecimento das estufas é feito através da combustão de gás natural num queimador, em que o ar aquecido juntamente com os gases de combustão são introduzidos na câmara da estufa através de um ventilador. No interior da câmara, estando esta devidamente carregada com os moldes ou peças húmidas, o ar quente é responsável pelo processo de secagem. De forma a reciclar o ar e reaproveitar parte da energia, ar recirculado, existe uma abertura de ligação entre a câmara e o queimador, existindo também uma conduta de exaustão de forma a que o ar húmido possa sair e ser renovado. Ao terminar o tempo do ciclo de secagem os moldes ou peças são retirados das estufas com as condições de humidade requeridas.

Só foram possíveis concretizar dois ensaios experimentais, onde neste trabalho apenas são apresentados os resultados obtidos para um deles. No caso do ensaio utilizado, o tempo total do ciclo de secagem durou cerca de 139 horas devido a fatores externos. O ensaio experimental foi devidamente dividido em várias etapas que são descritas nos tópicos seguintes.

➤ Anotação da preparação da pasta:

De forma a conhecer um valor aproximado acerca da constituição dos moldes, foi necessário registar a “receita” utilizada para a preparação dos moldes, permitindo assim ter uma noção da razão gesso/água na sua preparação. Na Tabela 4.1 encontram-se as percentagens utilizadas de cada constituinte de que é formada a pasta preparada na realização do ensaio experimental.

Tabela 4.1 - Composição da pasta para a produção de moldes do ensaio experimental.

Material	%(m/m)
Gesso 68S	14,58
Gesso Normal	43,75
Água	41,67

➤ Recolha de dados referentes à carga:

Foi realizado um levantamento do tipo de moldes constituintes da carga a secar bem como a respetiva quantidade, de forma a quantificar a massa que entrou e saiu da estufa no ciclo de secagem. Para isso, realizou-se a pesagem dos moldes no início e no fim da secagem. Assim, tornou-se possível saber a quantidade de água que foi retirada dos

moldes. Na Tabela 4.2 encontram-se os dados referentes à carga utilizada no ensaio experimental.

Tabela 4.2 - Dados da carga de um ciclo de secagem para um determinado ensaio.

Descrição Molde	Nº Moldes	Massa Verde (kg/Unidade)	Massa Verde Total (kg)	Massa Seca (kg)	Δm (kg)	Perda de massa (%)
Lavatório Slim	6	107	642	450	192	30%
Lavatório Aviz 60	6	137	822	588	234	28%
Lavatório Recife	38	104	3952	3002	950	24%
Lavatório Platinum	12	350	4200	3120	1080	26%
Arco Bacia One Suspensa	18	60	1080	756	324	30%
Bacia One Suspensa	16	273	4368	3320	1048	24%
TOTAL	96	1031	15064	11236	3828	27%

Na Figura 4.2 é possível visualizar as diferenças de massa dos moldes à entrada e saída do ciclo de secagem, sendo que a perda de massa de água teve uma média de 27%.

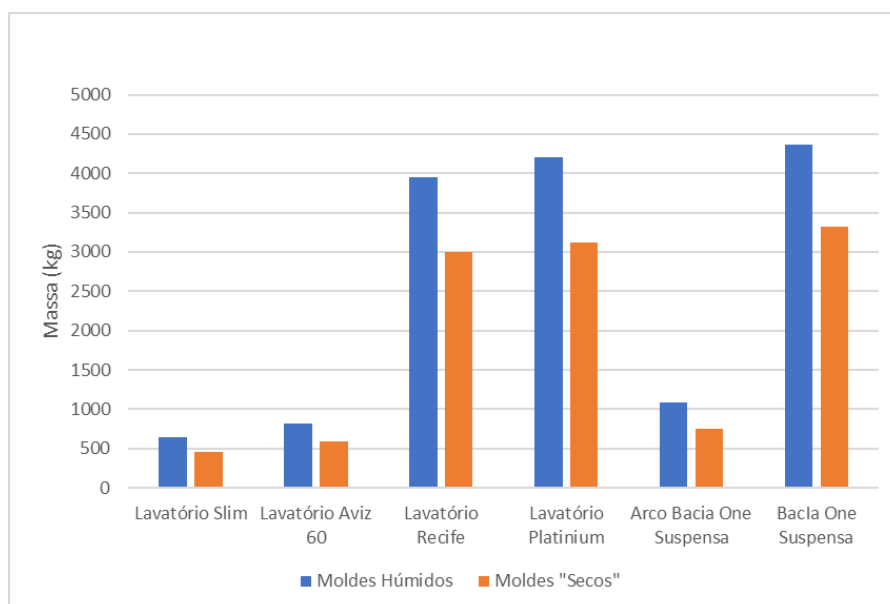


Figura 4.2 - Massa dos moldes à entrada e saída do ciclo de secagem.

➤ Consumo de Gás Natural:

Para quantificar a quantidade de gás natural utilizado no ciclo de secagem, foi necessário recorrer a registos antigos dos consumos de gás natural das estufas. Essa medida foi tomada devido à ausência de um contador de gás que fizesse a leitura de consumo com apenas uma estufa em funcionamento. Assim sendo, recorreu-se aos consumos de gás natural dos anos 2010 e 2011, em que o número de ciclos de

secagens rondavam os 6 a 7 ciclos por mês. Na Tabela 4.3 encontram-se os consumos referentes aos anos 2010 e 2011 respetivamente, tendo sido considerado um valor médio de 6,5 ciclos por mês.

Tabela 4.3 - Dados referentes ao consumo de gás natural para os anos 2010 e 2011.

(m ³)	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média (m ³)
Ano 2010	3640	7469	7224	6633	7137	5597	5831	4	6615	8547	7301	7277	6661
Ano 2011	12604	2832	4659	6629	8327	6087	5663	0	994	5345	3629	2993	5433
	Ano 2010							Ano 2011					Média Total
m ³ /Ciclo	1025							836					930
kg/Ciclo	822							670					746

➤ Consumo elétrico:

Durante o ciclo de secagem existe a necessidade de consumo elétrico por parte de alguns constituintes da estufa, sendo estes os recirculadores de ar no interior da estufa (dois “Dryflex”), dois ventiladores para inserção e exaustão do ar e o queimador. De forma a determinar a potência elétrica consumida, recorreu-se a uma pinça amperimétrica para registar a intensidade de corrente elétrica dos vários constituintes, tornando possível o cálculo da potencia e energia total consumida. Na Tabela 4.4 encontra-se os valores referidos.

Tabela 4.4 - Dados referentes ao consumo elétrico de uma estufa de secagem.

Consumo Elétrico Total	
Tensão Elétrica (V)	400
Corrente Elétrica (A)	18,1
Potência Elétrica (kW)	7,24

➤ Velocidades do ar:

Para possibilitar a realização de balanços de massa e energia à estufa, foi necessário conhecer a quantidade de ar que entra e abandona o sistema. Para tal, inicialmente recorreu-se ao auxílio de um anemómetro, cujas características encontram-se no anexo A. Foi medida a velocidade de escoamento do ar à entrada da conduta dos gases de exaustão, tendo esta sido dividida em 4 secções iguais.

Na Figura 4.3 encontra-se a representação das 4 secções referidas de área igual. Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios obtidos para a conduta de exaustão.

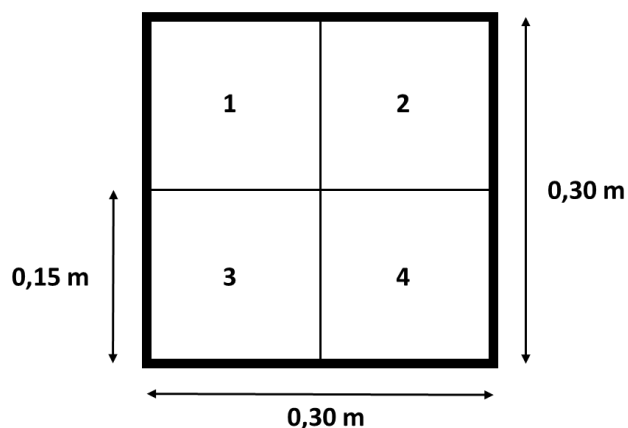


Figura 4.3 - Divisão da conduta dos gases de exaustão em 4 partes iguais.

Tabela 4.5 - Dados obtidos e cálculo do caudal de ar na conduta de exaustão.

Zona	v (m/s)	A (m ²)	T (°C)	Q _{Gases Ex.} (m ³ /s)
1	26,6	0,0225	25,7	0,60
2	19,4		25,6	0,44
3	27,1		25,7	0,61
4	20,3		25,5	0,46
Total	23,35	-	25,625	2,10

Devido a grandes oscilações na leitura do anemómetro, e devido ao fato de os valores obtidos parecerem demasiado elevados, procurou-se outra alternativa para quantificar os caudais das correntes de ar. Para tal, recorreu-se a um relatório de análise aos gases de combustão das estufas para retirar os valores necessários para a quantificação das correntes. A partir desse relatório retirou-se a velocidade de escoamento do ar na conduta de exaustão que foi medida numa zona em que a secção da conduta é circular. Obtida a velocidade de escoamento, determinou-se o respetivo caudal. Na Figura 4.4 encontra-se representado um corte da referida conduta e na Tabela 4.6 os valores obtidos.

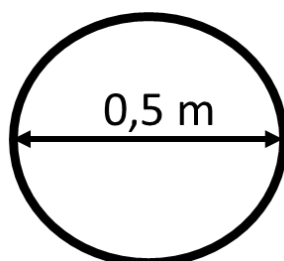


Figura 4.4 - Corte da conduta principal de exaustão onde foram efetuadas as medições.

Tabela 4.6 - Valores obtidos do escoamento dos gases de exaustão.

Corrente	v (m/s)	A (m ²)	Q _{Total} (m ³ /s)	Q _{Estufa} (m ³ /s)
Gases Ex. Hum.	18,14	0,196	3,56	0,71

Comparando os caudais obtidos pelos dois métodos, optou-se por utilizar os valores obtidos através do relatório da análise dos gases de combustão, em que apesar de não ser o método mais correto, foi o que apresentou resultados mais plausíveis.

Na Tabela 4.7 encontra-se representado os valores obtidos para o ensaio experimental em que o tempo do ciclo foi de 139 horas.

Tabela 4.7 - Valores de escoamento dos gases de exaustão para o ensaio experimental com duração de 139 horas.

Corrente	T (°C)	Y _R (%)	ρ (kg/m ³)	Q _{Gases Ex.} (m ³ /s)	ṁ _{Gases Ex.} (kg/Ciclo)
Gases Ex.	51,63	14,60	1,089	0,71	387761

➤ Registo da Temperatura e Humidade:

Durante todo o ensaio recorreu-se a dois aparelhos indicadores de temperatura e humidade, um situado no interior da câmara e outro na entrada de ar fresco no queimador. Estes aparelhos foram responsáveis pelo registo das variáveis indicadas, durante todo o ensaio com uma periodicidade de registo de 30 minutos. Na Figura 4.5 e na Figura 4.6 é possível visualizar a variação da temperatura e da humidade, respetivamente, do ar fresco que irá dar entrada no queimador para ser aquecido.

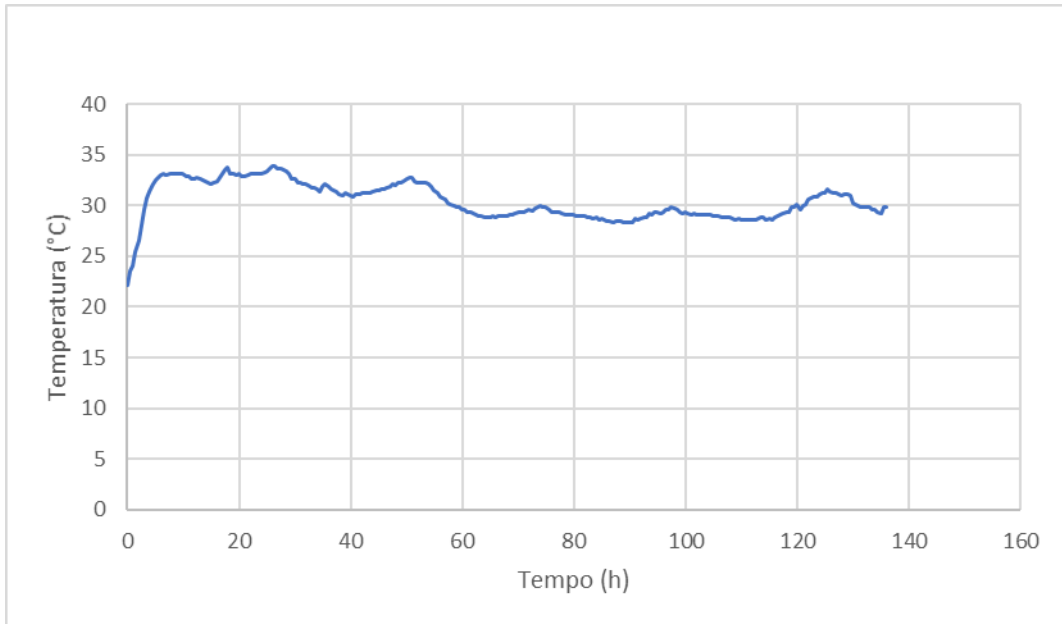


Figura 4.5 - Variação da temperatura do ar fresco à entrada do queimador.

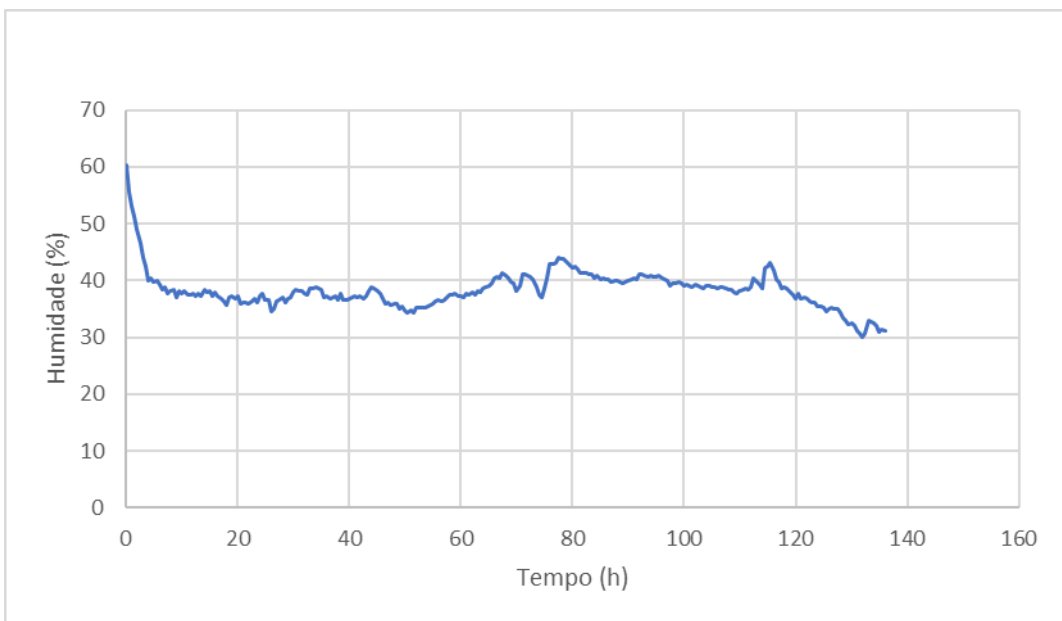


Figura 4.6 - Variação da humidade do ar fresco à entrada do queimador.

Observando a Figura 4.5 é possível visualizar um aumento da temperatura, cujo aumento é devido ao próprio funcionamento do queimador e das perdas de energia provenientes do teto da câmara da estufa, aquecendo o ar envolvente. Relativamente ao decréscimo da humidade na Figura 4.6, este está diretamente interligado com o aumento da temperatura, pois quanto mais quente estiver o ar, maior quantidade de humidade este irá suportar. Os valores médios de temperatura e humidade relativa obtidos foram 27,92°C e 37,73% respetivamente.

Na Figura 4.7 e na Figura 4.8 estão representadas as variações da temperatura e humidade respetivamente, no interior da câmara da estufa.

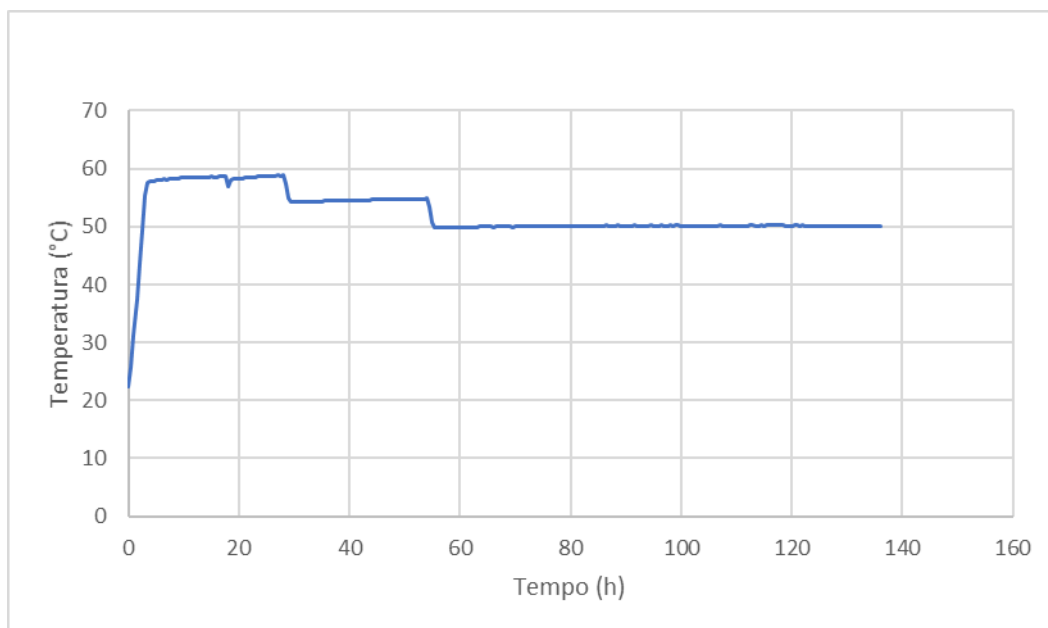


Figura 4.7 - Variação da temperatura no interior da câmara da estufa.

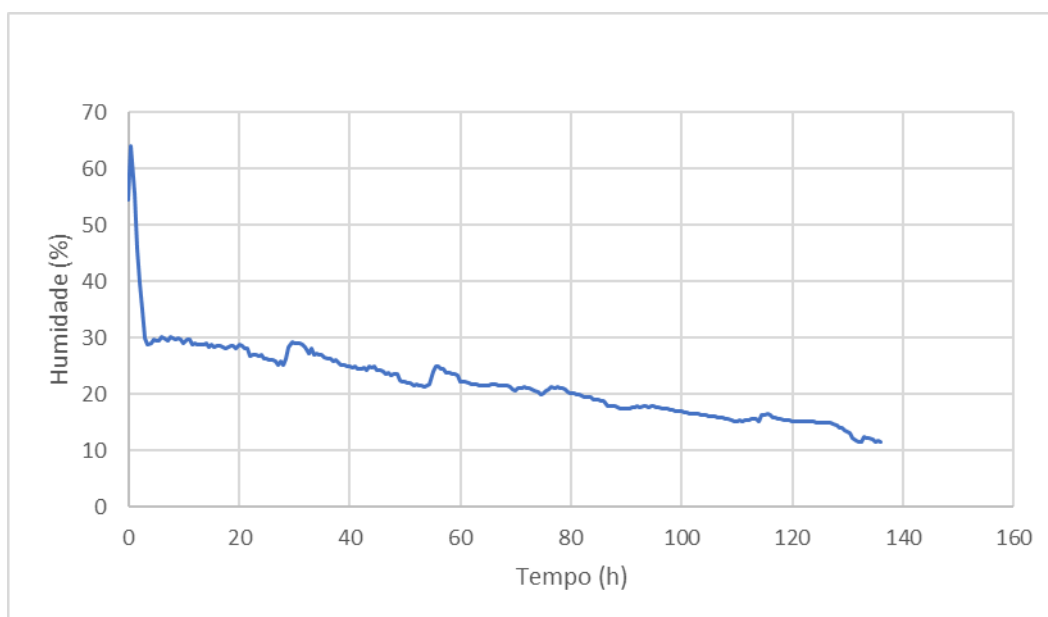


Figura 4.8 - Variação da humidade no interior da câmara da estufa.

Observando as figuras representadas acima, constata-se que a temperatura obteve o comportamento desejado, tendo sido estipulado pelo programa de controlo da temperatura. No caso do comportamento da humidade, esta decresce abruptamente na fase inicial do ciclo de secagem, acabando por estabilizar e ir decrescendo continuamente consoante a secagem dos moldes no interior da estufa. Este

comportamento da humidade advém da inexistência de qualquer controlo desta, proporcionando uma entrada e saída de ar continua na estufa de secagem. Os valores médios de temperatura e humidade relativa obtidos foram 51,63°C e 21,32% respetivamente.

➤ Acompanhamento da variação de peso de um Molde em estudo:

Para avaliar melhor o processo de secagem, foi instalada uma balança no interior da estufa, possibilitando o acompanhamento da variação de massa de um dos moldes, ao longo do ensaio experimental. Assim foi possível elaborar uma curva de secagem característica do molde em estudo, estando esta representada na Figura 4.9.

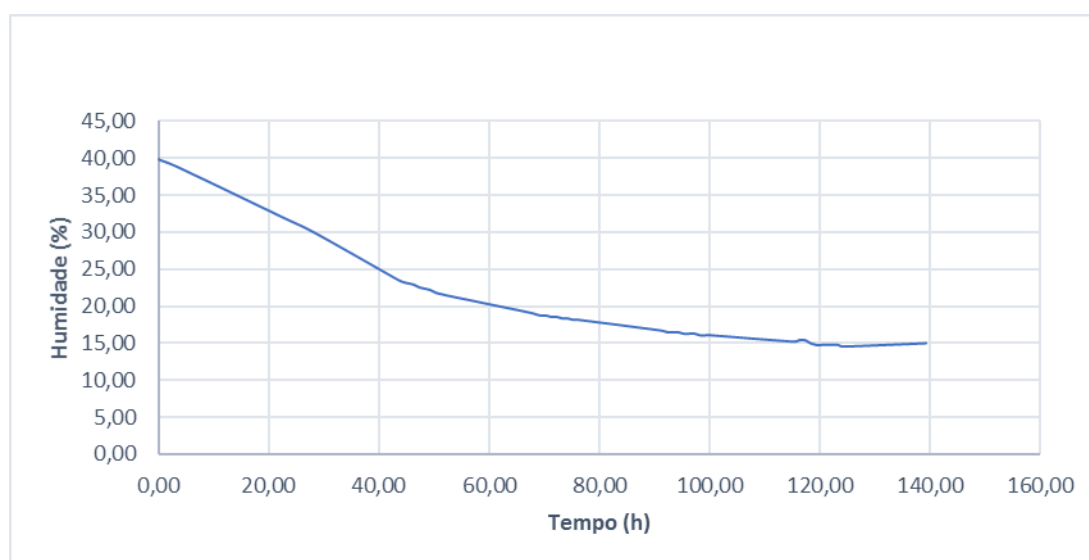


Figura 4.9 - Curva de secagem do molde em estudo.

Observando a curva de secagem obtida verifica-se que para as condições de operação impostas na estufa, a humidade mínima que o molde irá atingir andarà rondar os 15%, sendo esse valor atingido quando já tinham decorrido cerca de 118 horas de ciclo. Posto isto, conclui-se que para as mesmas condições de operação, o tempo estipulado para o ciclo, 175 horas, é exagerado, podendo este ser diminuído.

De forma a complementar este estudo, recorreu-se a um ensaio laboratorial efetuado na empresa ARCH Valadares, estando este estudo devidamente descrito no anexo F. Com base no estudo referido, pode-se concluir que a quantidade de água que os moldes perdem para as mesmas condições de operação impostas nas estufas de secagem, rondam os 30%. No caso do molde em estudo, esse valor foi atingido quando já tinham

decorrido cerca de 120 horas de ciclo, como se pode constatar na Figura 4.10, sendo um reforço à ideia que o tempo de ciclo estipulado se encontra exagerado.

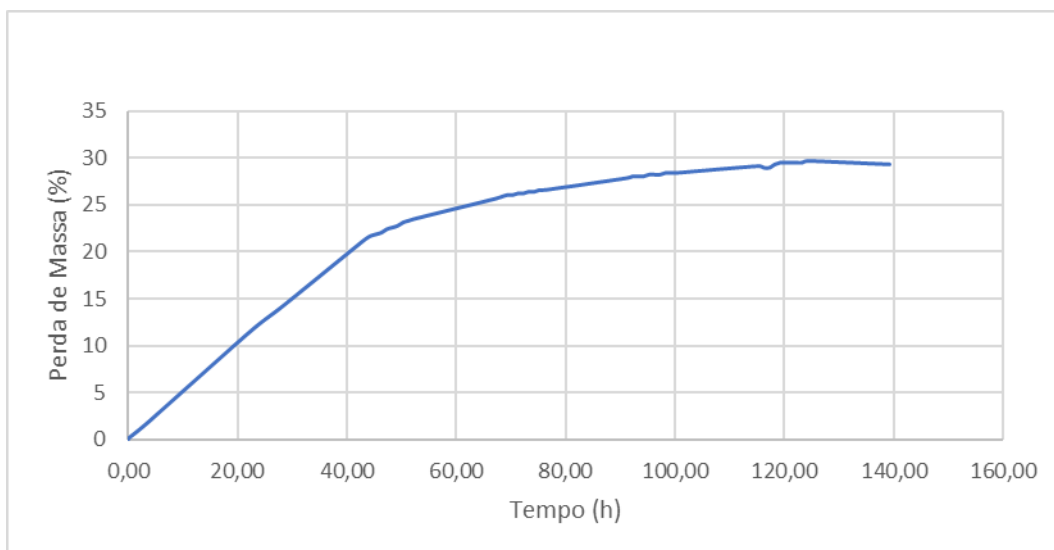


Figura 4.10 - Variação da massa de água do molde ao longo do ciclo de secagem.

➤ Quantificação de fugas de ar:

Durante a realização do ensaio experimental, verificou-se a existência de fugas de ar ao longo da porta da estufa de secagem, mais precisamente na zona superior e inferior da porta. Visto que estas fugas proporcionam um impacto negativo na eficiência energética das estufas, torna-se necessário quantificá-las, possibilitando a aplicação de futuras medidas de otimização, em que neste caso seria a eliminação das referidas fugas. Para tal, dividiu-se as zonas referidas em vários setores, e com o auxílio de um anemómetro mediu-se a velocidade de escoamento do ar no respetivo setor. Na Figura 4.11 encontra-se representado a divisão efetuada na zona superior e inferior respetivamente.

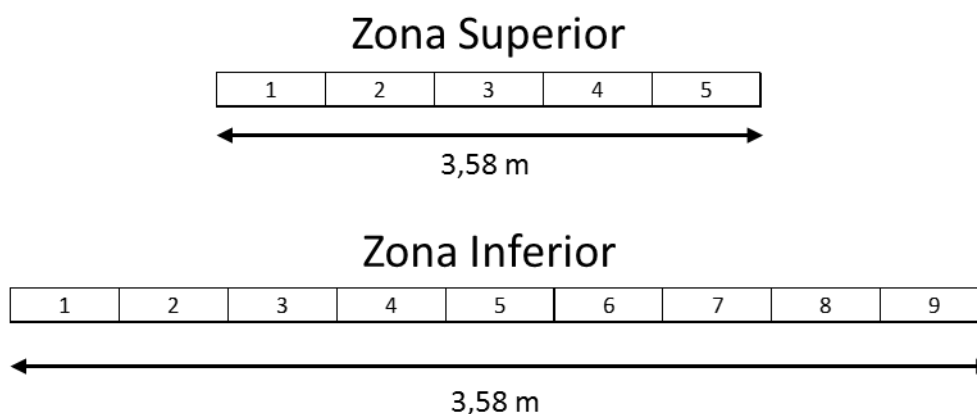


Figura 4.11 – Representação da divisão efetuada na zona das fugas.

Apesar de as duas zonas terem o mesmo comprimento, foi necessário dividir em mais secções a zona inferior devido ao desgaste da borracha isolante que aí se encontrava. É importante referir que a Figura 4.11 não se encontra à escala, sendo que cada secção tem uma área diferente e não igual como sugere a figura. Na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9 encontram-se os valores lidos e obtidos para a zona superior e inferior respetivamente.

Tabela 4.8 - Valores obtidos para as fugas na zona superior (Q_{Fs}).

Zona Superior			
Zona	v (m/s)	A (m²)	Q_{Fs}(m³/s)
1	14,00	0,00351	0,0491
2	14,00	0,00351	0,0491
3	15,50	0,00351	0,0544
4	12,50	0,00286	0,0358
5	11,00	0,002	0,0221
Q_{Total}	-	-	0,210

Tabela 4.9 - Valores obtidos para as fugas na zona inferior (Q_{Fi}).

Zona Inferior			
Zona	v (m/s)	A (m²)	Q_{Fi}(m³/s)
1	12,00	0,00204	0,0245
2	11,00	0,000680	0,00748
3	0,00	0,00	0,00
4	2,00	0,000075	0,00015
5	12,00	0,00076	0,00912
6	17,00	0,0014	0,0238
7	14,50	0,0018	0,0261
8	12,50	0,000425	0,00531
9	0,00	0,00	0,00
Q_{Total}	-	-	0,0964

Para calcular o caudal de ar respetivo a cada secção recorreu-se à equação 4.1:

$$Q_{Fuga} = v \times A \quad (4.1)$$

Somando todos os caudais obtidos para as duas zonas, obtém-se o caudal total de fugas de ar pela porta da estufa de secagem, $Q_{T.Fugas}=0,307 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na Tabela 4.10 encontra-se representado os valores obtidos no ensaio experimental, em que o tempo do ciclo foi de 139 horas.

Tabela 4.10 - Valores das fugas obtidas no ensaio experimental.

Corrente	T (°C)	Y _R (%)	ρ (kg/m ³)	Q _{T.Fugas} (m ³ /s)	ṁ _{Fugas Ar} (kg/Ciclo)
Fugas Ar Quente	51,63	21,32	1,089	0,307	167063

4.2 Balanços

Obtidos os dados atrás mencionados torna-se possível realizar os balanços de massa e energia de forma a avaliar e diagnosticar o comportamento energético das estufas.

4.2.1 Balanços de Massa

Como já foi referido anteriormente, algumas das correntes do processo foram determinadas recorrendo a ensaios e à consulta de um relatório de análise aos gases de combustão. Assim sendo, no caso da corrente de Gás Natural (\dot{m}_{GN}), esta foi obtida através do registo dos contadores disponíveis nas instalações. Já a corrente de gases de exaustão ($\dot{m}_{Gases\ Ex.\ Hum.}$) foi calculado com o auxílio de um relatório da análise dos gases de combustão provenientes das estufas, tendo sido adicionado o caudal de fugas de ar existentes na porta.

Os caudais correspondentes às outras correntes do sistema foram obtidos a partir dos seguintes balanços:

- Determinação do caudal de ar de combustão ($\dot{m}_{Ar\ Comb.}$), tendo sido considerado um excesso de ar (E_{Ar}) de 15%:

$$\dot{m}_{Ar\ Comb.} = \frac{\dot{m}_{GN}}{MM_{GN}} \times \left(\frac{n_{Ar}}{n_{comb.}}\right)_{Est.} \times MM_{Ar} + \left(\frac{\dot{m}_{GN}}{MM_{GN}} \times \left(\frac{n_{Ar}}{n_{comb.}}\right)_{Est.} \times MM_{Ar}\right) \times E_{Ar} \quad (4.2)$$

- Determinação do ar fresco que entra no queimador ($\dot{m}_{Ar\ F.}$), recorrendo ao balanço global da estufa, apresentada da Figura 4.1:

$$\dot{m}_{Ar\ F.} + \dot{m}_{Ar\ Comb.} + \dot{m}_{GN} + \dot{m}_{H2O\ Moldes\ Hum.} = \dot{m}_{Gases\ Ex.\ Hum.} + \dot{m}_{H2O\ Moldes\ Secos} \quad (4.3)$$

Os caudais mássicos das correntes de ar/gases determinados contêm vapor de água, sendo que para o cálculo dos balanços de energia torna-se necessário passar esses caudais para base seca. Para tal, recorre-se à equação 4.4:

$$\dot{m}_{g \text{ seco}} = \frac{\dot{m}_{g \text{ Hum.}}}{(1 + Y_{esp})} \quad (4.4)$$

4.2.2 Balanços de Energia

Com os balanços de massa devidamente definidos e com todas as correntes quantificadas, torna-se possível realizar os balanços de energia.

Considerando a 1ª lei da termodinâmica aplicada a um sistema aberto em estado estacionário onde não existe trabalho, obtém-se a equação 4.5:

$$q_P = \sum H_S - \sum H_E \quad (4.5)$$

Substituindo a equação 4.5 pelas correntes responsáveis pelo funcionamento do sistema, e tendo em atenção a reação de combustão que ocorre no queimador obtém-se a equação 4.6:

$$q_P = H_{Gases \text{ Ex.Hum.}} + H_{Moldes \text{ Secos}} - (H_{GN} + H_{Ar \text{ Comb.}} + H_{Ar \text{ F.}} + H_{Moldes \text{ Hum.}}) \quad (4.6)$$

A equação 4.6 vai de encontro ao princípio da conservação de energia que é estabelecido pela primeira lei da termodinâmica, em que a energia presente nas correntes de saída (moldes secos e a corrente de gases de exaustão) foi obtida a partir da energia contida nas correntes de entrada (corrente de ar fresco, gás natural, ar de combustão e moldes húmidos) e da energia posta em jogo pela reação de combustão. Como na realidade o sistema não se encontra em condições ideais, parte dessa energia será dissipada (q_P).

Como o sistema presente corresponde a uma operação de secagem, a maioria das correntes consistem em correntes de ar/gases a uma dada temperatura e com teor de humidade, sendo estas a corrente de ar fresco, corrente de ar de combustão e a corrente de gases de exaustão. Para o cálculo da entalpia associada a cada corrente de gás recorre-se a equação 4.7, em que envolve o caudal mássico correspondente à corrente (\dot{m}_g) e a entalpia específica da mesma (h_g).

$$H_g = \dot{m}_{g \text{ seco}} \times h_g \quad (4.7)$$

Para o cálculo da entalpia específica (h_g) é necessário definir um estado de referência que foi estabelecido como sendo gás seco a 0°C e água líquida a 0°C. Após essa definição, a entalpia específica é calculada recorrendo à equação 4.8:

$$h_g = cp_{Ar} \times (T_{Ar} - T_{Ref}) + Y_{Esp} \times [cp_{VH_2O} \times (T_{VH_2O} - T_{Ref}) + \lambda_{VH_2O}^{T_{Ref}}] \quad (4.8)$$

O cálculo da energia de cada corrente é efetuado de acordo com as equações seguintes:

➤ Determinação do caudal térmico do Gás Natural.

Tendo em conta o caudal mássico de gás natural, as suas propriedades físicas e a definição de uma temperatura de referência, torna-se possível calcular o caudal térmico de gás natural através da equação 4.9:

$$H_{GN} = \dot{m}_{GN} \times PCI_{GN} + \dot{m}_{GN} \times cp_{GN} \times (T_{GN} - T_{Ref}) \quad (4.9)$$

Neste cálculo acima referido, como se pode constatar, encontra-se já integrado o cálculo da ΔH_0^{298} da reação, que pode ser obtido através da equação 4.10:

$$\Delta H_0^{298} \text{ Reação} = \dot{m}_{GN} \times PCI_{GN} \quad (4.10)$$

➤ Determinação do caudal térmico da corrente de Ar de Combustão.

De forma a calcular o caudal térmico do ar de combustão, equação 4.11, é necessário conhecer o respetivo caudal mássico ($\dot{m}_{Ar \text{ Comb. Seco}}$) e a entalpia específica ($h_{Ar \text{ Comb.}}$), cujo os cálculos foram anteriormente referidos nas equações 4.4 e 4.8.

$$H_{Ar \text{ Comb.}} = \dot{m}_{Ar \text{ Comb. Seco}} \times h_{Ar \text{ Comb.}} \quad (4.11)$$

➤ Determinação do caudal térmico da corrente de ar fresco.

Relativamente ao cálculo do caudal térmico da corrente de ar fresco ("Ar F."), este é semelhante ao cálculo do ar de combustão, mudando apenas as condições das correntes. Na equação 4.12 encontra-se o cálculo referido:

$$H_{Ar F.} = \dot{m}_{Ar F. Seco} \times h_{Ar F.} \quad (4.12)$$

➤ Determinação do caudal térmico dos Gases de Exaustão.

O cálculo do caudal térmico dos Gases de exaustão (“Gases Ex. Hum.”), foi efetuado da mesma forma que o cálculo do caudal de ar de combustão e do caudal de ar fresco:

$$H_{Gases\ Ex\ Hum.} = \dot{m}_{Gases\ Ex\ Seco.} \times h_{Gases\ Ex\ Hum.} \quad (4.13)$$

➤ Determinação do caudal térmico associado aos Moldes.

Para o cálculo do caudal térmico associado aos moldes, é necessário conhecer a massa dos moldes secos ($m_{Molde\ S.}$), ou seja, a massa correspondente apenas ao gesso; do calor específico do gesso (cp_{Gesso}); da massa de água presente nos moldes ($m_{M.H2O}$) e da capacidade calorífica da água (cp_{H2O}). Este cálculo serve tanto para as condições de entrada como as de saída, sendo que variável é a temperatura e a quantidade de água contida nos moldes. O cálculo foi efetuado a partir da equação 4.14.

$$H_{Moldes} = (m_{Molde\ S.} \times cp_{Gesso} + m_{M.H2O} \times cp_{H2O}) \times (T_{Molde} - T_{Ref}) \quad (4.14)$$

No anexo G, é possível consultar exemplos de cálculos correspondente aos valores obtidos para os caudais térmicos de cada corrente.

➤ Resultados obtidos nos balanços de energia:

Após a realização de todos os balanços de energia, obtiveram-se os caudais térmicos envolvidos no processo de secagem das estufas. Os valores dos caudais térmicos obtidos para o ensaio experimental realizado encontram-se na Tabela 4.11:

Tabela 4.11 - Resultados obtidos nos balanços de energia.

ENTRADAS		SAÍDAS	
Corrente	H (kJ/Ciclo)	Corrente	H (kJ/Ciclo)
Gás Natural	2,86E+07	Gases Ex. Hum.	5,36E+07
Ar Combustão	5,81E+05	Moldes Secos	1,23E+06
Ar Fresco	2,71E+07	Perdas	2,12E+06
Moldes Húmidos	7,23E+05	-	-
TOTAL	5,70E+07	-	5,70E+07

Analisando a tabela 4.11, verifica-se que nas correntes de entrada, as que possuem um maior caudal térmico correspondem à de gás natural e à de ar fresco. Já nas correntes de saída, é a corrente de gases de exaustão a responsável por transportar grande parte da energia térmica, como esperado. Relativamente à corrente de perdas, esta corresponde a toda a energia térmica perdida pelas superfícies da estufa; paredes, teto, porta, etc.

4.3 Cálculo das Perdas:

Como referido anteriormente, o sistema de secagem analisado não corresponde a um sistema em condições ideais, o que leva a ter perdas de energia associado. Para possibilitar um levantamento energético completo tornou-se necessário quantificar as respetivas perdas.

Após uma análise das condições de funcionamento da estufa concluiu-se que as perdas significativas de energia seriam apenas numa das paredes (plano vertical) e no teto da estufa (plano horizontal), sendo que os fenómenos de transferência de energia que estão envolvidos entre o interior e o exterior são a condução, convecção e radiação.

➤ Cálculo das perdas pela parede e teto da estufa:

Na Figura 4.12 encontra-se representado uma parede vertical onde ocorre transferência de calor por condução, convecção e radiação.

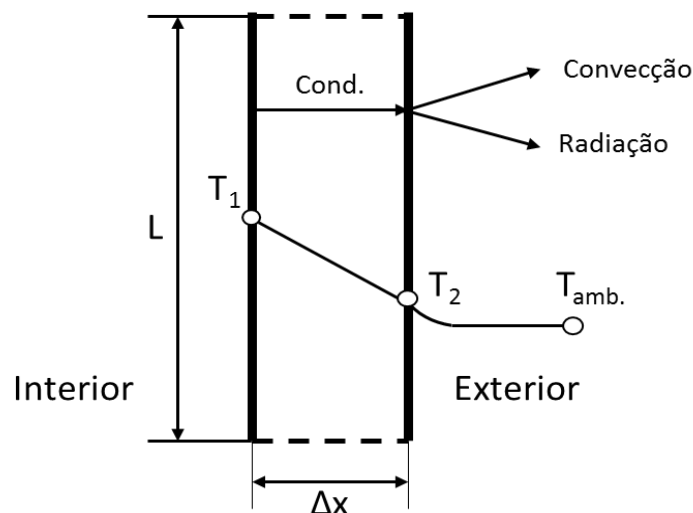


Figura 4.12 - Representação das transferências de calor numa parede vertical.

Para quantificar as perdas de energia foi necessário determinar inicialmente o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_{Conv}). Para o caso de uma parede vertical, o cálculo de h_{Conv} pode ser obtido através da seguinte correlação empírica:

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387 \times Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right)^2 \quad 10^4 < Ra_L < 10^{13} \quad (4.15)$$

Com:

$$Nu = \frac{h_{Conv} \times L}{K_{Ar}} \quad (4.16)$$

$$Ra_L = \frac{g \times \beta \times (T_2 - T_{Amb}) \times L^3 \times \rho^2}{\mu^2} \times Pr \quad (4.17)$$

Para a parede vertical, a dimensão característica usada foi a altura (L):

$$L = L \quad (4.18)$$

As propriedades físicas foram determinadas à temperatura média:

$$T_{Ref} = \frac{T_2 + T_{amb}}{2} \quad (4.19)$$

No caso das perdas pelo teto da estufa, plano horizontal, o coeficiente de transferência de calor por convecção é obtido pela equação 4.20:

$$Nu = 0,15 \times Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad 10^7 < Ra_L < 10^{11} \quad (4.20)$$

Neste caso a dimensão característica foi:

$$L = \frac{A_S}{P} \quad (4.21)$$

Após a obtenção do coeficiente de transferência de calor por convecção foi possível determinar as respectivas perdas de energia para os dois casos:

$$q_{Cond} = K_{Parede} \times A_S \times \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \quad (4.22)$$

$$q_{Conv} = h_{Conv} \times A_S \times (T_2 - T_{Amb}) \quad (4.23)$$

$$q_{Rad} = \sigma \times \varepsilon \times A_S \times (T_2^4 - T_{Amb}^4) \quad (4.24)$$

$$q_{Cond} = q_{Conv} + q_{Rad} \quad (4.25)$$

Todos os valores considerados para a realização dos cálculos encontram-se no anexo D e todas as equações utilizadas para o cálculo das perdas tiveram por base a bibliografia (Cengel, 1998).

➤ Resultados obtidos para as perdas de energia:

Para o ensaio experimental realizado, cujo tempo de ciclo durou cerca de 139 horas, foram obtidas as seguintes perdas de energia para a parede lateral e teto da estufa:

Perdas Calculadas	
Zona	q_p (kJ/Ciclo)
Parede Lateral	1,24E+06
Teto	1,63E+05
Total	1,40E+06

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que as perdas de energia dissipadas pela parede lateral da estufa são muito superiores comparativamente com as dissipadas pelo teto da mesma. Essa diferença pode dever-se a dois fatores: o material de que é constituído o teto (celotex, material isolante com uma condutividade muito mais baixa do que a parede), e o facto de grande parte da energia dissipada pelo teto ser reaproveitada para o aquecimento do ar fresco que irá dar entrada no queimador, diminuindo a necessidade de gás natural para aquecer o respetivo ar.

Comparando os valores de perdas calculadas através da parede lateral e do teto com o valor de perdas obtidas pelo balanço de energia, conclui-se, como esperado, que essas superfícies são as responsáveis pela maior quantidade de energia dissipada, sendo que as restantes (porta da estufa, outras paredes, etc.), são praticamente desprezáveis.

Na Figura 4.13 encontra-se a representação das quantidades de energia dissipadas pela parede lateral/teto e pelas restantes superfícies.

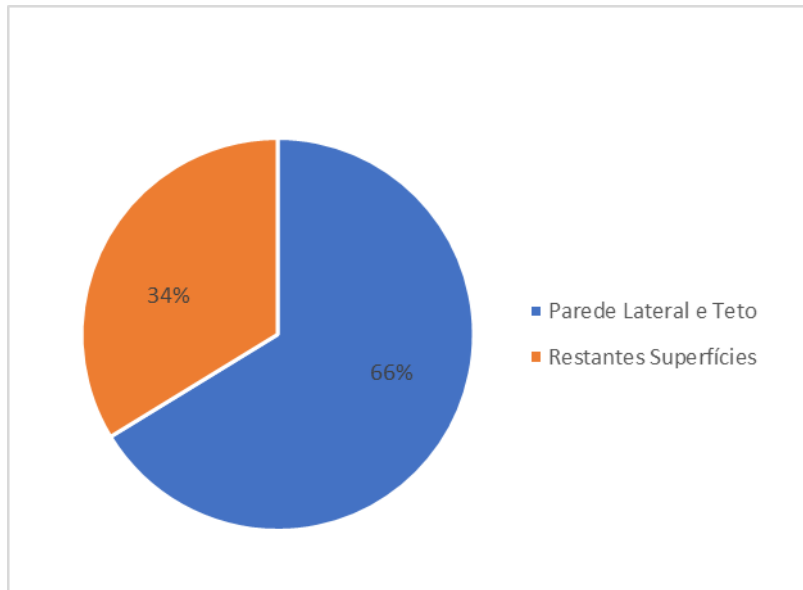


Figura 4.13 - Comparação da energia dissipada pela parede lateral e teto com as restantes superfícies da estufa.

5 Medidas de otimização

Após o levantamento energético das estufas de secagem de moldes em condições normais de funcionamento e conhecido todo o seu processo detalhado foi possível definir um plano de otimizações com o intuito de melhorar o seu desempenho, aumentando a sua eficiência, diminuindo o consumo energético e consequentemente os custos associados.

Neste capítulo encontra-se apresentado o plano de otimizações estipulado para a respetiva otimização energética com as descrições e menções relevantes para a aplicação. Os resultados obtidos para todos os métodos de otimização estudados foram realizados através da comparação com um ciclo de secagem nas condições normais a que as estufas se encontravam na altura do levantamento energético, ou seja, para as condições de operação referidas anteriormente e um tempo total de ciclo de 175 horas. Na Tabela 5.1 encontram-se os custos associados a um ciclo normal de funcionamento.

Tabela 5.1 - Custos de funcionamento de uma estufa em condições normais.

Condições Normais	
\dot{m}_{GN} (m ³ /Ciclo)	930,27
Custo GN (€/m ³)	0,47
Custo GN (€/Ciclo)	435
Custo Eletricidade (€/Ciclo)	70
Custo Total (€/Ciclo)	505

No anexo C encontram-se os custos de eletricidade para diferentes tempos de ciclo de secagem.

5.1 Plano de otimização energética das estufas

As medidas de otimização definidas e estudadas neste trabalho foram:

- Implementação de um isolamento térmico adequado nas paredes das estufas.
- Vedação de fugas de ar pelas portas das mesmas.
- Controlo da humidade no interior da estufa durante os ciclos de secagem.
- Otimização do tempo dos ciclos de secagem.
- Reaproveitamento de energia dos gases de exaustão para outros ciclos de secagem.

5.1.1 Implementação de isolamento térmico

Após uma detalhada observação do funcionamento das estufas de secagem chegou-se à conclusão que a melhor opção para o isolamento térmico das estufas seria a aplicação de placas de lã de rocha na parede entre estufas (parede mais fina, com cerca de 0,085 metros), apenas em um dos lados. As restantes paredes não necessitam de isolamento, pois são paredes de tijolo duplo com isolamento já aplicado entre as camadas de tijolos, não apresentando perdas significativas de energias que justificasse uma nova medida de isolamento. Relativamente ao teto da câmara da estufa, apesar de esta ser constituída por um material com uma condutividade térmica baixa (Celotex), existe sempre perdas de energia associadas, mas não se optou por melhorar o seu isolamento, pois grande parte dessa energia dissipada pelo teto será reaproveitada para o aquecimento do ar que entra no queimador (corrente de “Ar Fresco”), diminuindo assim o consumo de gás natural. No caso das portas das estufas, também se optou por não isolar, pois concluiu-se que o investimento necessário iria ser muito elevado devido à necessidade de substituição completa das mesmas. Posto isto, a única medida de isolamento térmico seria o revestimento da parede entre estufas como já referido. Na Figura 5.1 encontra-se um exemplo da medida referida para uma melhor perceção, sendo que as linhas a vermelho correspondem ao isolamento aplicado.

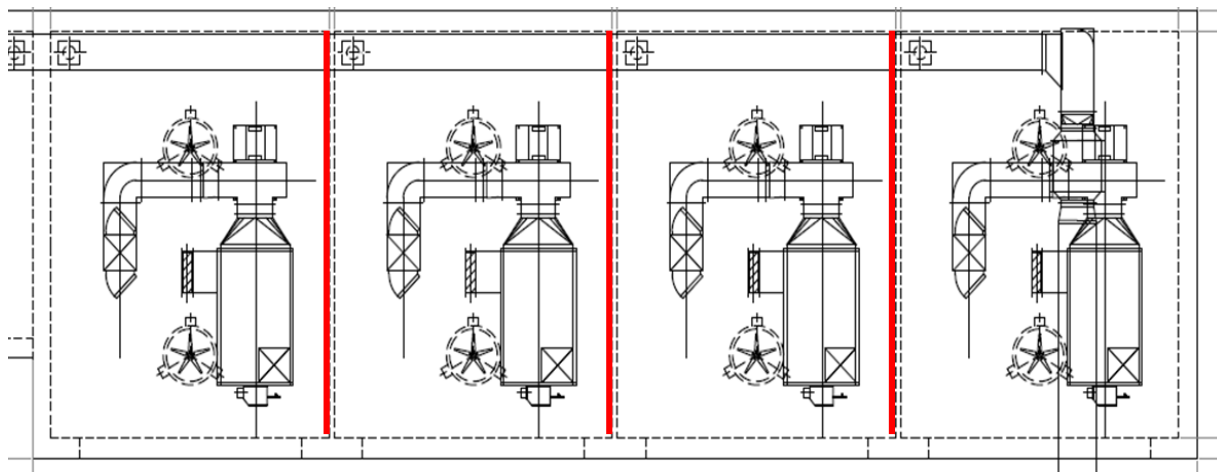


Figura 5.1 - Esquema representativo das estufas de secagem com o isolamento aplicado.

Após a aplicação do isolamento em lã de rocha, a necessidade de gás natural utilizado na estufa diminuiu, tendo sido considerado que as perdas de energia pela parede lateral diminuíram em 95%. Na Tabela 5.2 encontra-se os valores obtidos.

Tabela 5.2 - Valores obtidos com a aplicação do isolamento térmico.

Aplicação Isolamento	
$q_{\text{Perdas Parede S/Isolamento}}$ (kJ/Ciclo)	1,56E+06
$q_{\text{Perdas Parede C/Isolamento 95\%}}$	1,48E+06
\dot{m}_{GN} Poupado (m^3/Ciclo)	38,26
Preço GN ($\text{€}/\text{m}^3$)	0,47
Poupança ($\text{€}/\text{Ciclo}$)	18

Observando os valores obtidos da tabela 5.2, verifica-se uma redução de 38,26 m³ de gás natural consumido, correspondendo a uma poupança de 18 €/Ciclo. Relacionando a poupança obtida com os custos associados a um funcionamento normal, obtém-se apenas uma redução de 4% nos custos totais, não representando uma poupança significativa.

5.1.2 Vedação de fugas de ar

Ao longo de ensaios foi possível verificar a existência de fugas de ar ao longo das portas das estufas, ar esse que estaria a ser aquecido desnecessariamente. Como medida de otimização decidiu-se eliminar as respetivas fugas, o que iria diminuir a quantidade de ar a ser aquecido e conseqüentemente o consumo de gás natural.

Na Figura 5.2 encontra-se representado um esquema da porta da estufa em duas perspetivas, sendo que a do lado esquerdo corresponde a uma vista de frente e a do lado direito a uma vista lateral. As zonas de fugas de ar, zona inferior e superior, encontram-se assinaladas pelos números 1 e 2 respetivamente. Relativamente às setas, estas representam o movimento de abertura da porta, e assinalado a vermelho encontra-se o local de aplicação da vedação.

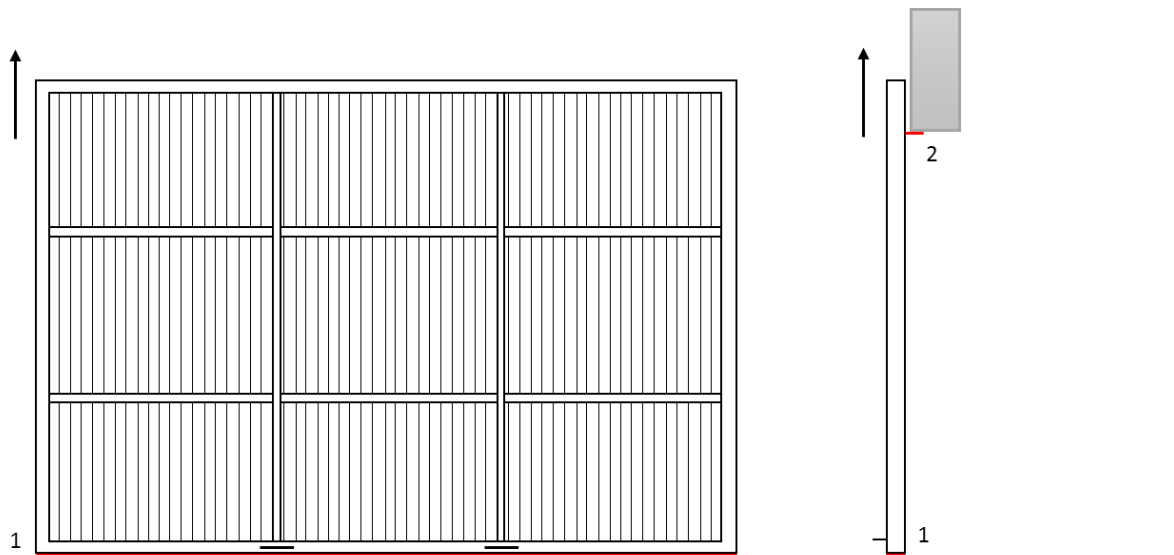


Figura 5.2 - Esquema representativo das portas das estufas vista de frente (imagem à esquerda) e vista lateral (imagem à direita).

Para a vedação das fugas de ar na zona inferior (zona 1), optou-se por utilizar uma borracha esponjosa aplicada ao longo da porta, tendo uma forma como se encontra representado na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Corte da borracha aplicada para vedação da zona 1.

Já na zona superior (zona 2), optou-se por utilizar uma vedação constituída por uma escova e não por uma borracha como na zona 1. Esta escolha deve-se ao fato de existir fricção entre a porta e a parede no processo de abertura e fecho da porta, o que no caso da utilização de uma borracha, esta rapidamente se iria deteriorar. Na Figura 5.4 encontra-se uma representação da vedação de tipo escova utilizada na zona 2.

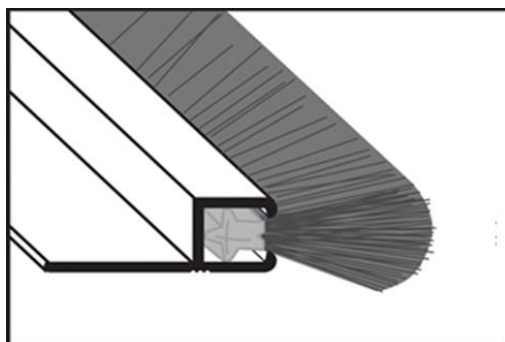


Figura 5.4 - Representação do vedante de tipo escova utilizada para a vedação da zona 2.

Para os dois casos, houve a preocupação de encontrar materiais que aguentassem as condições de operação das estufas sem que se deteriorassem rapidamente.

Após a aplicação das duas medidas referidas anteriormente, presume-se a eliminação das fugas de ar, reduzindo conseqüentemente a necessidade de gás natural. Na Tabela 5.3 encontram-se os valores obtidos.

Tabela 5.3 - Valores obtidos com a eliminação das fugas de ar.

Eliminação de Fugas	
$\dot{m}_{GN} C/\text{Fugas de Ar (m}^3/\text{Ciclo)}$	930,27
$\dot{m}_{GN} S/\text{Fugas de Ar (m}^3/\text{Ciclo)}$	675,07
Poupança (€/Ciclo)	119

Analisando a Tabela 5.3 conclui-se que, ao eliminar completamente as fugas de ar existentes na porta da estufa consegue-se reduzir o consumo de gás natural em 255,19 m³/Ciclo, correspondendo a uma poupança de 119 €/Ciclo. Comparando os custos associados ao funcionamento normal da estufa com esta medida de otimização aplicada, consegue-se atingir uma redução de cerca 24% nos custos totais.

5.1.3 Controlo da humidade

Como já foi explicado no capítulo 3, as estufas de secagem encontram-se equipadas com uma programação de controlo de humidade no interior das câmaras ao longo dos ciclos de secagem. No momento em que o levantamento energético foi efetuado, o programa referido não se encontrava em utilização, o que proporcionava uma entrada e saída de ar a um caudal constante durante todo o ciclo de secagem. Não existindo

uma justificação para o programa não estar a ser utilizado, propôs-se a reativação do controlo da humidade, diminuindo o caudal de ar necessário para a secagem, e consequentemente o consumo de gás natural para o aquecimento da respetiva corrente de ar.

Toda a descrição de funcionamento do programa de controlo da humidade, como os respetivos set-points e a curva de humidade que deveria acompanhar o processo de secagem encontram-se presentes no subcapítulo 3.1.

Como não houve forma de quantificar experimentalmente a redução dos caudais de ar ao aplicar esta medida de otimização, realizou-se um estudo em que é estipulado uma redução que vai desde os 5% até aos 30%, de forma a ter uma estimativa na redução de custos associados a esta medida de otimização. Na Tabela 5.4 encontram-se os valores obtidos para o referido estudo, sendo que na Figura 5.5, estão representadas as poupanças resultantes das várias percentagens estipuladas para a redução do caudal de ar.

Tabela 5.4 - Valores obtidos com o controlo da humidade.

Condições Normais S/Controlo da Humidade						
\dot{m}_{GN} (m ³ /Ciclo)	930,27					
C/Controlo da Humidade						
Redução	5%	10%	15%	20%	25%	30%
\dot{m}_{GN} (m ³ /Ciclo)	878,84	838,27	797,69	757,12	716,55	675,97
Poupança (€/Ciclo)	24	43	62	81	100	119

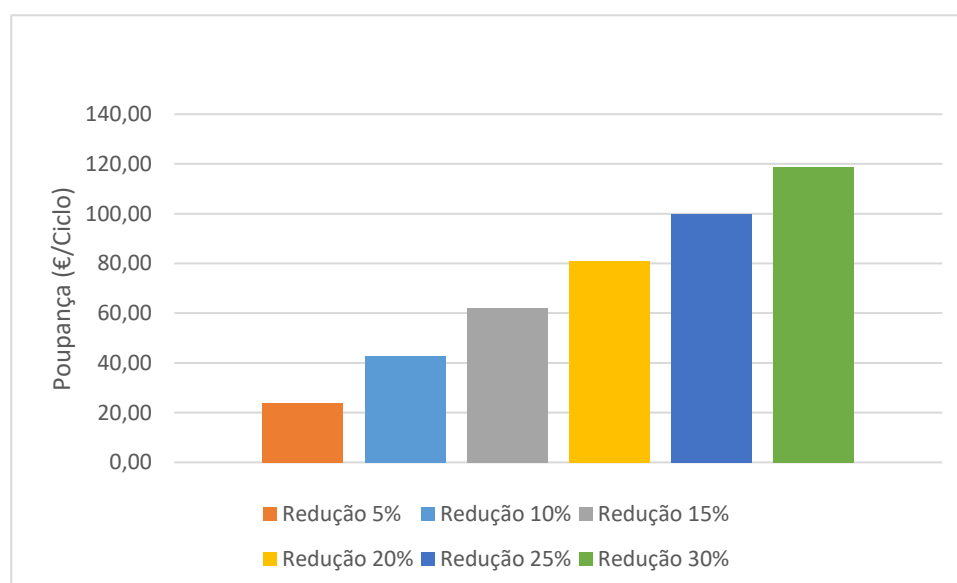


Figura 5.5 - Poupanças obtidas para as várias reduções de caudal de ar.

Observando a Tabela 5.4 e Figura 5.5 verifica-se que com as reduções estipuladas podem ser atingidas poupanças que vão desde os 24 €/Ciclo até aos 119 €/Ciclo, sendo que ao comparar os custos associados a um funcionamento normal da estufa com, por exemplo, 20% de redução de ar, consegue-se obter uma redução de cerca de 16% nos custos totais. É importante ainda referir que como não foi possível quantificar a verdadeira redução dos caudais de ar ao implementar o controlo da humidade, existe a possibilidade que a redução seja ainda maior, atingindo valores de poupança superiores aos da redução de 30%.

A grande vantagem desta medida de otimização, é que para além de diminuir os custos de operação das estufas, não requer qualquer tipo de investimento por parte da empresa para a sua aplicação.

5.1.4 Otimização do tempo dos ciclos

Através de um acompanhamento do peso de um molde ao longo do ciclo de secagem, consegue-se traçar a curva de secagem característica do molde para as condições de operação em que a estufa se encontra. Traçada a curva, que está representada na Figura 4.9, torna-se possível definir o tempo ótimo de secagem para tais condições de operação, permitindo verificar se o ciclo de secagem se encontra a operar durante tempo desnecessário. Caso tal se verifique, o tempo estipulado do ciclo pode ser reduzido, diminuindo o consumo de gás natural e consequentemente os custos de operação.

De forma a estudar o impacto que poderá ter a redução do tempo do ciclo das estufas nos custos a estas associados, estabeleceram-se quatro tempos de ciclos diferentes, nomeadamente 151 horas, 139 horas (tempo do ensaio experimental realizado), 127 horas e 103 horas. Como referido anteriormente, ao diminuir o tempo do ciclo, reduz consequentemente o consumo de gás natural, estando os valores obtidos representados na Tabela 5.5 e Figura 5.6.

Tabela 5.5 - Valores obtidos para os diferentes tempos de ciclo estipulados.

	<i>Condições Normais (175 Horas)</i>	<i>151 Horas</i>	<i>139 Horas</i>	<i>127 Horas</i>	<i>103 Horas</i>
\dot{m}_{GN} ($m^3/Ciclo$)	930,27	802,69	738,90	675,11	547,53
<i>Poupança (€/Ciclo)</i>	-	60	89	119	179

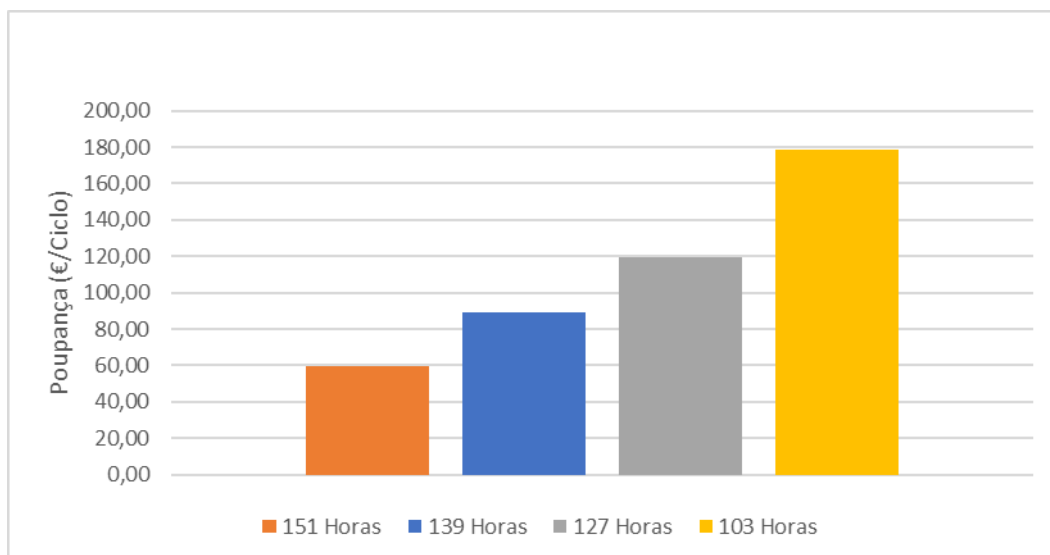


Figura 5.6 - Representação da poupança obtida para os diferentes tempos de ciclo impostos.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que a poupança pode ir desde os 60 €/Ciclo até aos 179 €/Ciclo, sendo este último valor já exagerado, pois pode comprometer a secagem dos moldes por não permanecerem tempo suficiente para uma secagem completa.

Com base na Figura 4.9, verifica-se que a partir do momento em que foram atingidas as 118 horas de ciclo, a massa do molde em estudo não variou significativamente. Assim sendo, conclui-se que para as condições impostas na estufa, as 175 horas estipuladas de ciclo encontram-se exageradas, podendo ser reduzidas. Se às 118 horas de ciclo foram atribuídas mais 9 horas, como margem de segurança, torna-se seguro afirmar que ao serem concluídas as 127 horas de ciclo, os moldes já se encontrarão devidamente secos. Comparando os custos associados ao funcionamento normal da estufa (175 horas) com a otimização do tempo para 127 horas, consegue-se atingir uma redução de 27% nos custos totais.

Tal como a medida de otimização do controlo da humidade, a otimização do tempo não requer nenhum tipo de investimento por parte da empresa, o que torna esta medida aliciente.

5.1.5 Reaproveitamento de energia dos gases de exaustão

Os gases de exaustão que abandonam as estufas encontram-se à temperatura de operação destas, que no caso da secagem dos moldes, durante um ciclo, a temperatura varia entre os 50 e os 60°C. Assim sendo, existe uma grande quantidade de energia a ser dissipada para o ar atmosférico. Como se procura otimizar os processos de secagem e reduzir os custos a que estes estão associados, o objetivo passará pelo reaproveitamento de pelo menos uma parte dessa energia dissipada. De forma a concretizar esse reaproveitamento, a melhor solução projetada seria redirecionar os gases de exaustão para o interior de uma outra estufa que esteja em funcionamento em simultâneo. Na Figura 5.7 encontra-se um esquema simplificado da implementação da otimização referida.

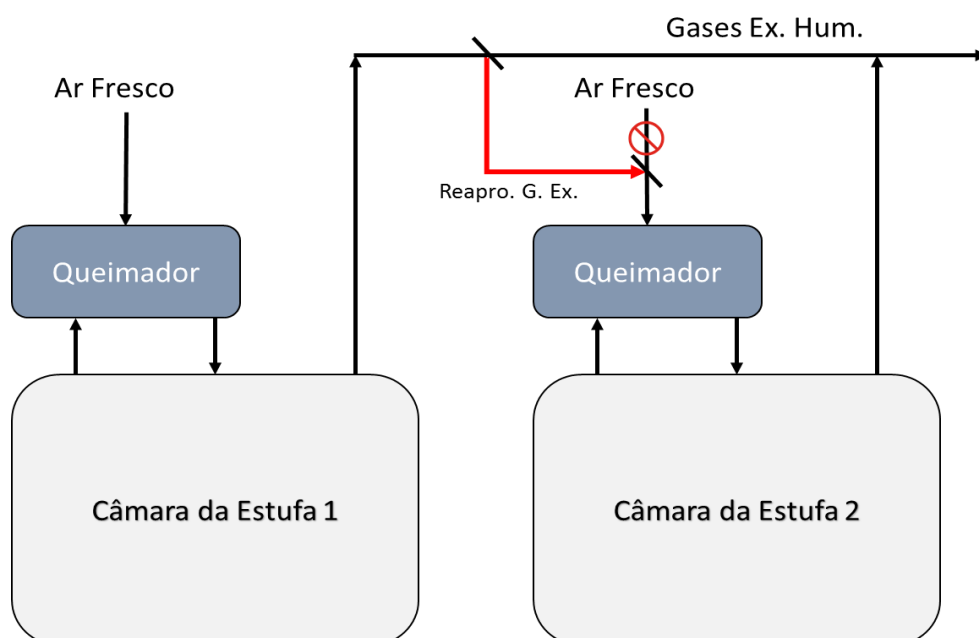


Figura 5.7 - Esquema da implementação do reaproveitamento dos gases de exaustão.

Com base no esquema apresentado na Figura 5.7, o processo passaria por redirecionar a condução de gases de exaustão provenientes da estufa 1, interligando-a com a condução de ar fresco da estufa 2. Com essa ligação, irá reduzir a necessidade de consumo do gás natural, pois em vez de o queimador ter de aquecer ar que se encontra a uma temperatura ambiente ("Ar Fresco"), apenas necessitará de aquecer ar que se encontra a uma temperatura mais próxima da requerida ("Reapro. G. Ex.").

De forma a estudar o impacto que esta medida teria nos custos de operação das estufas, definiu-se que o reaproveitamento dos gases de exaustão de um determinado ciclo daria início quando eram atingidas as 105 horas do mesmo ciclo. Para este caso, a humidade encontra-se nos 20%, faltando ainda 70 horas para perfazer o tempo estipulado. Assim sendo, o ciclo que irá receber os gases, irá ter as necessidades de gás natural praticamente saciadas nas primeiras 70 horas, tendo de apenas aquecer o ar dos 50°C (temperatura em que se encontram os gases de exaustão) até à temperatura estipulada pelo programa de secagem. Na Figura 5.8 é possível visualizar a comparação da energia fornecida pelos gases de exaustão (cor laranja) e a fornecida pelo gás natural (cor azul).

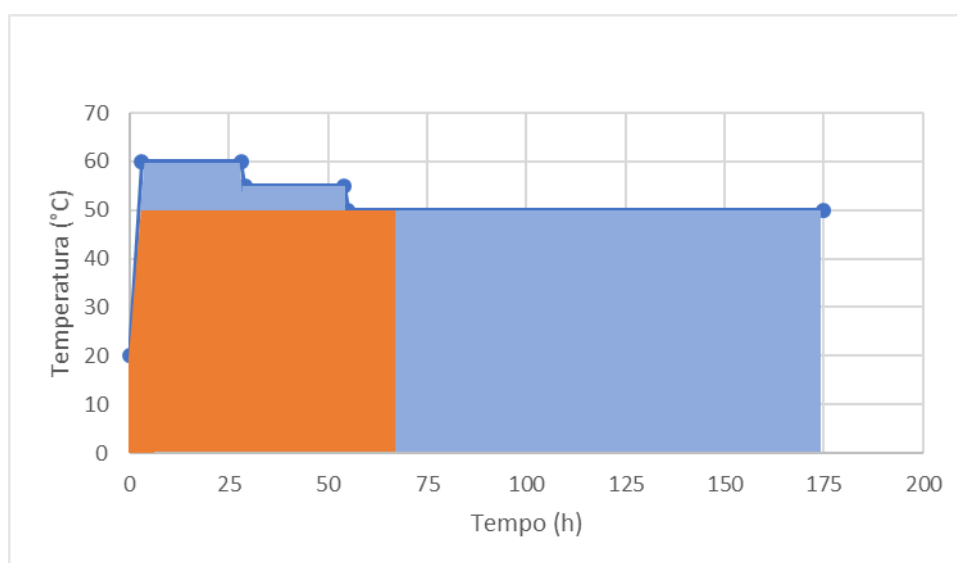


Figura 5.8 - Representação da energia fornecida pelos gases de exaustão (cor laranja) e a energia fornecida pelo gás natural (cor azul).

Com estas medidas referidas implementadas, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Poupança obtida com o reaproveitamento dos gases de exaustão durante 70 horas.

Reaproveitamento Gases Exaustão	
$\dot{m}_{GN} S/Reapr. (m^3/Ciclo)$	930,27
$\dot{m}_{GN} C/Reapr. (m^3/Ciclo)$	416,90
Poupança (€/Ciclo)	240

Analisando os resultados obtidos, se forem reaproveitados os gases de exaustão nas últimas 70 horas de um determinado ciclo, consegue-se atingir uma poupança de 240 €/Ciclo no ciclo que estará a receber os gases. Assim sendo, comparando os custos

associados ao funcionamento normal com o reaproveitamento dos gases, consegue-se reduzir em cerca de 48% nos custos totais de operação.

Como a humidade dos gases de exaustão provenientes da estufa 1 não pode comprometer a secagem dos moldes na estufa 2, deve-se ter a preocupação em não introduzir os gases demasiado húmidos, dificultando a secagem dos moldes; nem demasiado secos, pois pode providenciar uma secagem demasiado rápida, proporcionando possíveis deformações dos mesmos. De forma a contornar essa situação, pode-se misturar os gases de exaustão com a corrente de ar fresco.

Na Figura 5.9 encontra-se um esquema das 5 estufas com o reaproveitamento dos gases de exaustão.

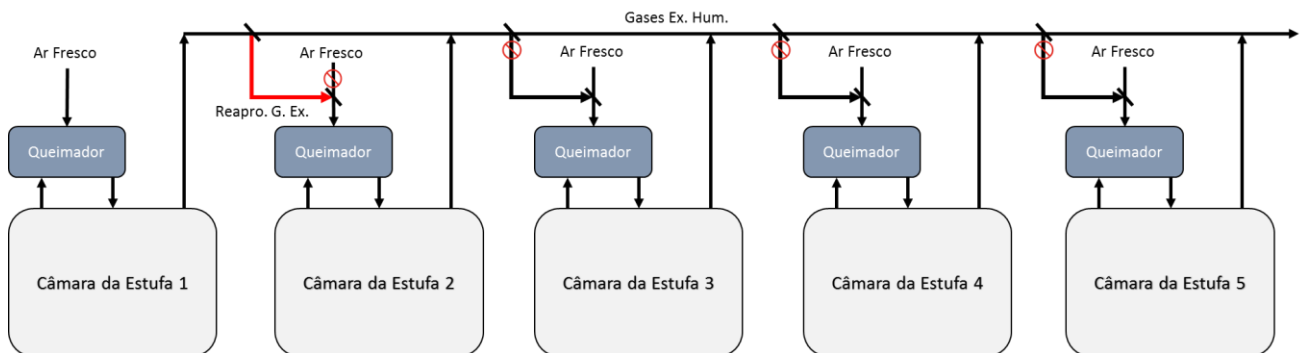


Figura 5.9 - Esquema do reaproveitamento dos gases de exaustão para as 5 estufas de secagem.

A grande desvantagem desta medida de otimização é por requerer o funcionamento de mais do que uma estufa em simultâneo, situação em que no momento atual da empresa raramente acontece.

O investimento necessário para a aplicação desta medida, irá ser superior comparativamente a outras medidas já apresentadas, necessitando de condutas novas de forma a interligar a conduta de exaustão com a conduta de ar fresco, e necessitando da implementação de divisores de feixe de forma a controlar o fluxo e direção das correntes. Com a passagem dos gases de exaustão reaproveitados pelo queimador, evita a necessidade de investimento em novos ventiladores, pois são utilizados os próprios ventiladores já equipados nos queimadores.

5.1.6 Combinação das medidas de otimização estudadas

Algumas das medidas de otimização referidas anteriormente podem ser conjugadas, aumentando consideravelmente a eficiência energética das estufas de secagem. Para tal decidiu-se verificar o impacto da combinação do controlo da humidade, da redução do tempo do ciclo e da eliminação das fugas de ar. Na Tabela 5.7 encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 5.7 - Resultados obtidos para a conjugação de otimizações estudadas.

Conjunto de Otimizações	
\dot{m}_{GN} S/Otimizações (m ³ /Ciclo)	930,27
\dot{m}_{GN} C/Otimizações (m ³ /Ciclo)	407,60
Poupança (€/Ciclo)	244

Analisando os resultados obtidos, com a conjugação das medidas de otimização referidas é possível atingir uma poupança total de 244 €/Ciclo em gás natural, que comparativamente aos custos associados a um funcionamento normal atinge-se uma redução de cerca de 52%.

É importante ter em conta que nem todas as medidas de otimização estudadas podem ser implementadas simultaneamente, pois poderá por em causa a secagem completa dos moldes. Posto isto, torna-se essencial que ao implementar uma conjugação das medidas, se faça um ensaio experimental de forma a verificar se a secagem dos moldes não foi comprometida.

5.1.7 Resumo geral das medidas de otimização estudadas

Na Tabela 5.8 e Figura 5.10 encontram-se representados os resultados obtidos relativamente aos custos totais (eletricidade e gás natural) para todas as medidas de otimização estudadas.

Tabela 5.8 - Resultados obtidos para as diferentes medidas estudadas.

	Condições Normais	Redução 20% Ar	S/Fugas Ar	Redução Tempo (127h)	C/Isolamento	Reap. Gases	Combinação Otimizações
Custo Total (€/Ciclo)	505	424	385	368	487	265	243
Redução de Custos (%)	-	16%	24%	27%	4%	48%	52%

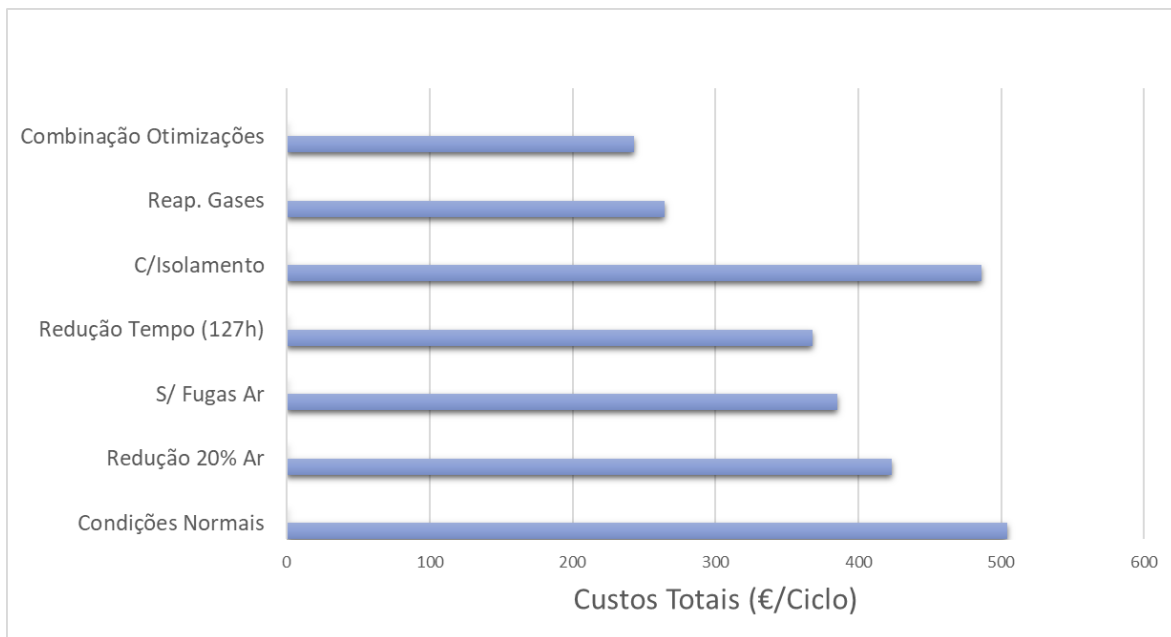


Figura 5.10 - Comparação dos custos totais das medidas de otimização estudadas.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que a medida de otimização que menos contribuiu para a redução dos custos de operação foi o isolamento térmico, apresentando apenas uma redução de 4%. Já o reaproveitamento dos gases de exaustão consegue reduzir em cerca de 48%. No entanto, a conjugação da redução do tempo, do controlo da humidade e da eliminação das fugas conseguem atingir uma redução de custo fixados nos 52%, mostrando ser a hipótese mais apelativa.

6 Análise Económica

Algumas das medidas de otimização estudadas necessitam de investimento de forma a tornar possível a sua aplicação. Como tal, neste capítulo encontra-se uma análise económica de forma a averiguar o tempo de retorno do investimento para cada medida de otimização estudada. Dentro dessas medidas, as que precisam de investimento são: Implementação de isolamento térmico, vedação das fugas de ar e o reaproveitamento de energia dos gases de exaustão. No caso do controlo da humidade e da otimização do tempo dos ciclos, não existe a necessidade de investimento, sendo que no momento da implementação destas duas medidas, existe de imediato redução do consumo de gás natural, sem qualquer custo para a empresa.

➤ Implementação de Isolamento térmico

Como referido anteriormente, de forma a isolar a parede lateral das estufas, estudou-se a implementação de lã de rocha com revestimento de chapa de alumínio. Para tal, consultou-se a empresa Prefal-Isolamentos (Prefal-Isolamentos, s.d.), de forma a pedir um orçamento, sendo o valor feedback obtido de 500€ de investimento por cada estufa, com todo o material e mão de obra incluído.

Implementado o isolamento, esta medida irá permitir poupar um valor de 18 €/Ciclo em gás natural, para um ciclo de 175 horas, sendo que para obter um retorno do investimento seriam necessários 28 ciclos de secagem. Na Tabela 6.1 encontram-se os valores da análise económica para o a implementação do isolamento numa estufa.

Tabela 6.1 - Valores da análise económica para a implementação de isolamento térmico.

Investimento	
Investimento Total (€)	500
Análise Económica	
Poupança (€/Ciclo)	18
Nº Ciclos para Retorno do Investimento	28

Com base no caudal produtivo observado durante o tempo de estágio, estima-se que até ao final deste ano corrente, 2017, serão efetuados cerca de 3 ciclos mensais para a secagem de moldes. Visto que o objetivo da empresa passa por aumentar a produção em 30% para o ano 2018, o número de ciclos mensais irá passar para 4. A partir desta informação, e visto que faltam 6 meses para terminar o ano de 2017, conclui-se que serão necessários no total cerca de 9 meses para obter o retorno do investimento total efetuado para a implementação da medida estudada. Na Tabela 6.2 encontra-se a estimativa efetuada para o tempo de retorno de investimento.

Tabela 6.2 - Tempo de retorno do investimento para a aplicação de isolamento térmico.

Ano	Nº Ciclos por mês	Nº Ciclos para Retorno do Investimento	Tempo de Retorno do Investimento (Meses)
2017	3	18	6
2018	4	10	2,5
Total	-	28	8,5

➤ Vedação de Fugas de Ar

Para a eliminação das fugas de ar existentes nas portas das estufas de secagem, é necessário investir em dois tipos de isolamentos diferentes, sendo aplicado na zona inferior um vedante do tipo borracha esponjosa e na zona superior um vedante do tipo escova. Estes dois tipos de isolamentos pretendidos foram encontrados na empresa Plastiborracha (Plastiborracha, s.d.), em que os preços vão de 2,56 €/m para a zona inferior a 36 €/m para a zona superior.

A eliminação das fugas irá permitir poupar um valor de 119 €/Ciclo em gás natural, sendo que para a implementação dos vedantes na zona superior e inferior seria necessário um investimento de 138 €/Estufa. Na Tabela 6.3 encontram-se os valores da análise económica para a medida de otimização estudada.

Tabela 6.3 - Valores da análise económica para a eliminação de fugas de ar.

Investimento	
Vedante Zona Inferior - Preço (€/m)	2,56
Vedante Zona Superior - Preço (€/m)	36
Investimento Total	
Comprimento Porta (m)	3,58
Investimento Necessário (€/Estufa)	138
Análise Económica	
Poupança (€/Ciclo)	119
Nº Ciclos para Retorno do Investimento	1,16
Tempo de retorno do investimento	1 Mês

Visto que a estimativa é de serem efetuados 3 ciclos por mês e serem necessários 1,16 ciclos para obter o retorno do investimento, o tempo total de retorno do mesmo será de apenas 1 mês.

➤ Reaproveitamento de energia dos gases de exaustão

Entre todas as medidas de otimização estudadas, esta é a que requer um maior investimento, pois altera a própria estrutura das estufas, interligando-as entre si. Esse investimento passa pela aquisição de novas condutas, motores de manipulação das persianas, defletores de ar e multipás (persianas), de forma a controlar os fluxos de ar. A implementação desta medida para a hipótese estudada no subcapítulo 5.1.5 irá permitir poupar um valor de 240 €/Ciclo em gás natural, sendo que para a aquisição dos materiais necessários, o investimento rondaria os 1342 €. É importante referir que estes custos de investimento apenas incluem o preço dos materiais, não incluindo a mão de obra. Na Tabela 6.4 encontram-se os valores da análise económica para esta medida de otimização estudada.

Tabela 6.4 - Valores da análise económica para o reaproveitamento dos gases de exaustão.

Investimento	
Motor Damper	
Preço (€/Unid.)	167,97
Nº Unidades Necessário	4
Conduatas	
Preço (€/m2)	28,22
Quantidade Necessário (m2)	10
Defletores de Ar	
Preço (€/Unid.)	34,02
Nº Unidades Necessário	4
Multipás (Persianas)	
Preço (€/Unid.)	62,85
Nº Unidades Necessário	4
Investimento Total	
Preço (€)	1342
Análise Económica	
Poupança (€/Ciclo)	240
Nº Ciclos para Retorno do investimento	5,59
Tempo de retorno do investimento	2 Meses

Visto que a estimativa é de serem efetuados 3 ciclos por mês e serem necessários aproximadamente 6 ciclos para obter o retorno do investimento, o tempo total de retorno do mesmo será de 2 meses.

Os preços dos vários materiais foram consultados em: (RS Components, s.d.) para os "Motor Dampers", (Conduatar, s.d.) e (Gerador de Preços, s.d.) para as conduatas de ar e (Conduatar, s.d.) para os defletores de ar e para as persianas.

7 Conclusões e propostas de trabalhos futuros

Esta dissertação de tese de mestrado teve como objetivo a avaliação e otimização energética das estufas de secagem presentes na empresa ARCH Valadares. O principal intuito desta otimização seria a redução dos consumos energéticos das mesmas e dos respetivos custos associados a esses consumos.

Inicialmente foi efetuado um levantamento energético da estufa de secagem número 2 de forma perceber o comportamento face ao consumo de energia por parte da mesma, verificando que cada ciclo de secagem impõe um custo de 505 € no consumo de gás natural e energia elétrica.

Após este levantamento e perceber todo o comportamento da mesma, estipulou-se cinco medidas de otimização a serem estudadas de forma a reduzir o consumo energético da estufa. As medidas estudadas foram: implementação de isolamento térmico, vedação de fugas de ar, controlo da humidade, otimização do tempo dos ciclos e o reaproveitamento de energia dos gases de exaustão.

No caso da implementação de isolamento térmico na parede lateral da estufa obteve-se uma redução de apenas 4% nos custos totais de energia, sendo que o tempo de retorno do investimento seria de 9 meses. Como sugestão, esta medida de otimização poderá ser substituída com apenas uma mudança de comportamento por parte dos operadores da estufa, visto que se as portas das mesmas se mantiverem sempre fechadas, mesmo estando desligadas, irá reduzir substancialmente as perdas de energia da parede para o ambiente exterior.

Para a vedação das fugas de ar obteve-se uma redução total de 24% nos custos totais de energia, apresentando um tempo de retorno de investimento de 1 mês. Posto isto, conclui-se que esta medida de otimização é rentável para a empresa.

Relativamente ao controlo de humidade, este apresentou uma redução de custos de 16% para o estudo efetuado (estimação de redução de 20% dos caudais de ar). Visto que esta medida de otimização não necessita de qualquer investimento por parte da empresa, torna-se uma medida vantajosa, podendo já ser implementada na empresa.

Para a otimização do tempo dos ciclos, este apresentou uma redução de custos de 27% para o estudo efetuado (reduzir o tempo de ciclo para um total de 127 horas), sendo que a par do controlo da humidade, não necessita de qualquer investimento, mostrando ser uma medida extremamente apelativa a pôr em prática.

Em relação ao reaproveitamento de energia dos gases de exaustão, este consegue atingir uma redução nos custos de operação de 48%, apresentando um tempo de retorno de investimento de 2 meses. Apesar da redução nos custos ser claramente superior comparativamente às outras medidas de otimização estudadas, esta medida tem a grande desvantagem de ser necessário a utilização de mais de uma estufa em simultâneo, sendo que na realidade atual da empresa, esse requisito dificilmente se cumpre. Concluindo, esta medida não será rentável no momento em que se encontra a ARCH Valadares, mas mostra um grande potencial para os planos futuros da mesma, pois o objetivo passa por aumentar a produção, aumentando o número de ciclos de secagem e consequentemente permitindo o uso de mais de uma estufa em simultâneo.

Foi também estudado a conjugação de três das medidas referidas anteriormente, sendo estas a vedação das fugas de ar, o controlo da humidade e a otimização dos tempos dos ciclos, atingindo uma redução de custos totais de 52%, representando uma poupança total de 261 €/Ciclo. Visto que só a vedação das fugas de ar necessita de investimento, bastaria apenas um ciclo de secagem para se obter o retorno do investimento, reforçando a ideia de que esta conjugação das medidas de otimização é a que mais se enquadra para a atualidade da empresa mostrando-se muito vantajosa.

Para trabalhos futuros e de forma a complementar este trabalho sugere-se:

- Caso exista um contador de gás natural funcional, realizar um novo ensaio experimental de forma a averiguar o consumo real de gás por parte das estufas, confrontando os valores obtidos nesta dissertação.
- Realização de novos ensaios experimentais com as medidas de otimização estudadas aplicadas, em que exista o acompanhamento de um molde em estudo de forma a verificar se a secagem do mesmo atinge os valores pretendidos.
- Estudo da aplicação de variadores de frequência nos ventiladores e recirculadores de ar, de forma a diminuir o consumo de energia elétrica.

Bibliografia

(s.d.).

Almeida, C. (2015). *Estado Atual do Setor das Energias Renováveis em Portugal*. Obtido em 28 de Março de 2017, de http://www.apren.pt/fotos/editor2/carlos_almeida.pdf

ARCH Valadares. (2017). *Highcer*. Obtido em 25 de Março de 2017, de <http://www.archvaladares.com/highcer/>

ARCH Valadares. (2017). *História desde 1921*. Obtido em 22 de Março de 2017, de Valadares: <http://www.archvaladares.com/historia/>

ARCH Valadares. (2017). *Inovação Gresanit*. Obtido em 25 de Março de 2017, de <http://www.archvaladares.com/inovacao-gresanit/>

Cengel, Y. A. (1998). *Heat Transfer: A Practical Approach* (Second ed.). New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Ceramic Industry. (2010). *Fine Fireclay*. Obtido em 25 de Março de 2017, de <http://www.ceramicindustry.com/articles/91333-fine-fireclay-great-expectations>

Condutar. (s.d.). *Fábrica de equipamentos para ventilação e ar condicionado*. Obtido em 15 de Maio de 2017, de <https://www.condutar.pt>

Coulson, J. F. (2002). *Particle Technology and Separation Processes* (Fifth ed., Vol. 2). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Direção Geral de Energia e Geologia. (2014). *Energia em Portugal*. Portugal.

Fenix Técnico. (2015). Obtido em 3 de Abril de 2017, de Universidade de Lisboa: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/282093452015757/Carta%20psicrometrica_1.pdf

Geankoplis, C. J. (1993). *Transport Processes and Unit Operations* (Third ed.). United States of America: Prentice-Hall International, Inc.

Gerador de Preços. (s.d.). Obtido em 15 de Maio de 2017, de Software para engenharia e construção: http://www.geradordeprecos.info/obra_nova/Instalacoes/Drenagens_e_ventilacao/Ventilacao_mecanica_para_garagens/ISG020_Conduca_de_ventilacao_de_seccao_rec_0_0_0_1_0.html

- Ibrahim Dincer, C. Z. (2016). *Drying Phenomena: Theory and Applications*. United States: John Wiley.
- Imports, Trade Winds. (2015). *Vitreous China vs Porcelain*. Obtido em 25 de Março de 2017, de <https://www.tradewindsimports.com/blog/vitreous-china-vs-porcelain/>
- Kitchen Bath Trends. (2013). *Vitreous China*. Obtido em 25 de Março de 2017, de <http://kitchenbathrends.com/vitreous-china-and-porcelain/>
- Martins, F. (2016). Sustentabilidade. *Gestão Industrial e Sustentabilidade*.
- Melo, L. D. (1979). *Secagem de Sólidos*. (D. d. Química, Ed.)
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying* (Fourth ed.). CRC Press.
- Pilão, R. (2016). Utilização Racional de Energia. *Gestão de Energia e Reengenharia do Processo*.
- Plastiborracha. (s.d.). *Plastiborracha*. Obtido em 8 de Maio de 2017, de www.plastiborracha.com
- Prefal-Isolamentos. (s.d.). *Bilfinger Industrial Services*. Obtido em 5 de Maio de 2017, de www.prefal.com.pt
- Ribeiro, M. (2012). Caderno de Secagem. *Processos de Separação*.
- RS Components. (s.d.). *RS Manutenção Industrial*. Obtido em 15 de Maio de 2017, de <http://pt.rs-online.com/web/p/actuadores-de-amortiguador/5041309/Novas>
- Sá, C. (2016). Secagem. *Gestão de Energia e Reengenharia do Processo*.
- Sousa, L. (2017). *Manual da Qualidade*. Arch Valadares, Sistema de Gestão de Qualidade.
- Strobel, C. (2012). *Psicometria por Christian Strobel*. Paraná.
- Thermic Designs Ltd. (1992). *Provision of Drying Equipment*. Thermic Designs.
- Vieira, E. T. (2000). *Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura de cerâmica vermelha*. Obtido em 3 de Abril de 2017, de Scielo: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132004000300013
- Zaikov, G. E. (2008). *Progress in Chemical and Biochemical, Physics, Kinetics and Thermodynamics*. New York: Nova Science Publishers, Inc.

Anexos

A. Aparelhos utilizados para realização de ensaios

Para possibilitar a realização dos balanços de massa e energia, bem como o estudo do comportamento das estufas de secagem de moldes foi necessário recorrer a diversos aparelhos de medição. Neste anexo encontram-se registados as características dos aparelhos utilizados.

A.1 Anemómetro

Os caudais das correntes de ar foram medidos com o auxílio de um anemómetro, cujas características do aparelho encontram-se na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Características do Anemómetro utilizado.

Anemómetro	
Marca	Testo
Referencia	0560-4501
Modelo	Sekunden-Anemometer 450
Alimentação	Bateria 9V
Velocidades Limites (Min/Máx)	0,4 / 60 m/s
Temperaturas Limites (Min/Máx)	-40°C / 140°C

A.2 Aparelho de registo de temperatura e humidade relativa do ar.

De forma a acompanhar a variação da humidade relativa e da temperatura no interior da estufa, foi utilizado um aparelho denominado de datalogger, o qual possibilita um registo periódico (intervalo de tempo a definir pelo utilizador) e também a gravação dos dados adquiridos que são transferidos para uma folha Excel. Foram utilizados dois aparelhos em cada ensaio, um para o registo da temperatura e humidade no interior da estufa e outro para os mesmos registos, mas na zona do queimador. Na Tabela A.2 encontram-se as características do aparelho referido.

Tabela A.2 – Características do aparelho Datalogger.

Datalogger	
Marca	Trotec
Modelo	BL30
Descrição	Clima-DataLogger
Alimentação	Bateria 3,6V
Temperaturas Limites (Min/Máx)	-40°C / 70°C
Humidades Relativas Limites (Min/Máx)	0% / 100%

A.3 Balança Digital

No acompanhamento da variação de peso de um molde em estudo, recorreu-se a uma balança digital, possibilitando o registo da variação do peso do molde ao longo de um ciclo de secagem. As características da balança utilizada para o estudo referido encontram-se na Tabela A.3.

Tabela A.3 - Características da balança digital.

Balança Digital	
Marca	Bilanciai
Modelo	EV22
Referencia	816151
Pesagens Limites (Min/Máx)	40 kg – 6000 kg

A.4 Pinça amperimétrica

Para permitir o conhecimento da intensidade de corrente elétrica, que permitiu a determinação da potência elétrica consumida numa estufa de secagem, recorreu-se a uma pinça amperimétrica, cuja descrição encontra-se na Tabela A.4.

Tabela A.4 - Características da pinça amperimétrica.

Pinça Amperimétrica	
Marca	TacTix
Referência	403057
Descrição	Multi-Meter AC Digital Clamp 600V CATIII

B. Gás Natural

Nas estufas de secagem de moldes, a principal fonte energética que assegura o funcionamento das mesmas é o gás natural. Assim sendo, torna-se relevante o conhecimento dos seus constituintes, percebendo o seu comportamento quando submetido a sua queima nos queimadores. Na Tabela B.1 encontram-se os constituintes e as respetivas quantidades do gás natural utilizado pela empresa ARCH Valadares, fornecida pela companhia EDP.

Tabela B.1 - Composição do Gás Natural.

Composto	Fórmula Química	Percentagem Molar (%)
Metano	CH ₄	87,885
Etano	C ₂ H ₆	8,056
Azoto	N ₂	1,088
Propano	C ₃ H ₈	1,378
Butano	C ₄ H ₁₀	1,532
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,061

Relativamente aos dados característicos do gás natural, estes encontram-se na Tabela B.2.

Tabela B.2 - Dados característicos do gás natural às condições adquiridas.

Gás Natural	
ρ (kg/m ³)	0,8019
P (Bar)	3,5
P _{Re} (Bar)	2,5
FcP (Bar)	3,467
T(°C)	11,0
FcT (°C)	0,961
cp (kJ/kg.K)	2,1
Ar Est. (mol _{Ar} /mol _{comb.})	10,74
PCI (kJ/kg)	48282,83

Para o cálculo do fator de correção da pressão (FcP) e do fator de correção da temperatura (FcT) recorre-se às equações B.1 e B.2 respetivamente. As duas equações foram retiradas da página online da EDP.

$$F_{cP} = \frac{P_{Re} + 1,013}{1,013} \quad (B.1)$$

$$F_{cT} = \frac{273,15}{273,15 + T_{GN}} \quad (B.2)$$

C. Eletricidade

Como já foi referido anteriormente, para o funcionamento das estufas de secagem, é necessário recorrer-se ao consumo de energia elétrica, nomeadamente para o funcionamento dos ventiladores, “Dryflexs” e do queimador. Com o auxílio de uma pinça amperimétrica mediu-se a intensidade de corrente, chegando à potência elétrica consumida por todos os constituintes da estufa. Na Tabela 4.4 encontra-se o consumo dos aparelhos referidos numa estufa de secagem.

Obtida a potência elétrica consumida pela estufa, e consultando o plano de tarifa estipulado para a empresa ARCH Valadares, torna-se possível chegar aos custos da eletricidade associado a um ciclo de secagem para uma estufa. Na Tabela C.1 encontra-se o preço unitário por fração horária.

Tabela C.1 - Preço unitário da eletricidade por fração horária.

	Fração	Preço Unit. (€)
HC	Horas Cheias	0,0619
P	Horas de Ponta	0,0637
V	Horas em Vazio	0,0489
SV	Horas em Super Vazio	0,0483

Na Tabela C.2 e Figura C.1 é possível consultar a distribuição horária para cada fração nos períodos semanais (2^a a 6^a), sábados e domingos para as épocas de verão e inverno.

CICLO SEMANAL COM FERIADOS

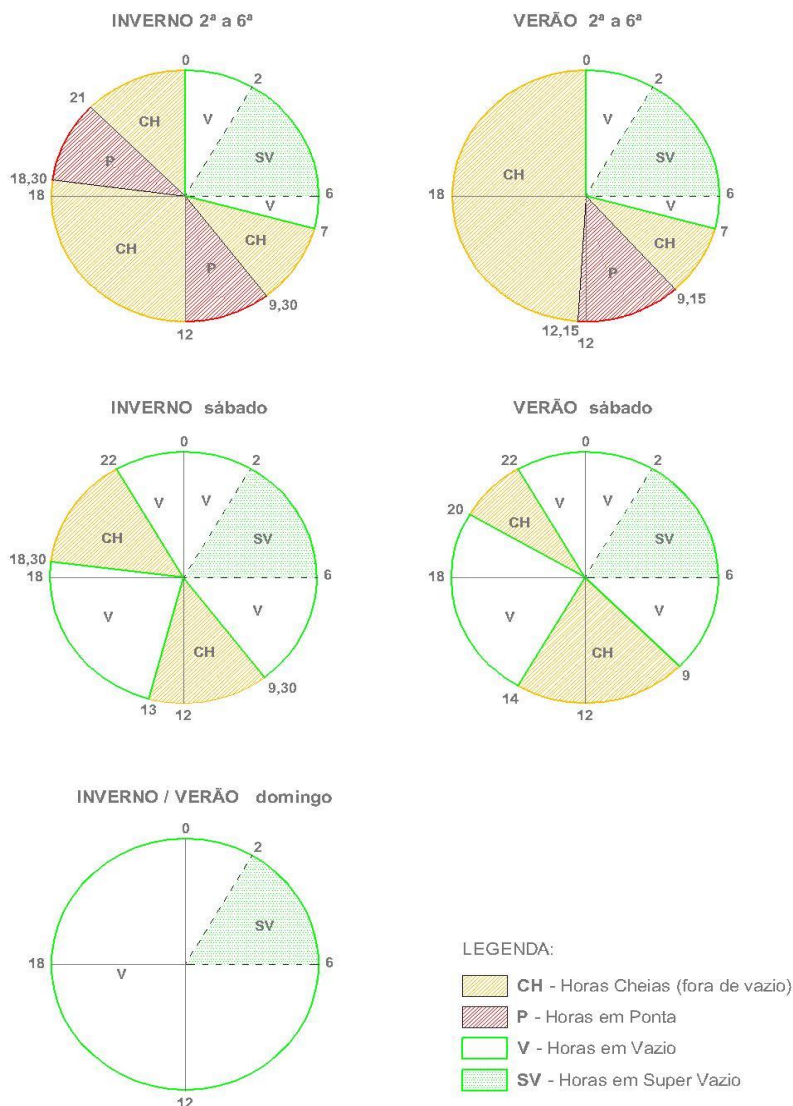


Figura C.1 – Distribuição horária por fração.

Tabela C.2 - Distribuição horária por fração.

Ciclo Semanal com Feriados (Horas)

Fração	Inverno			Verão		
	Dia de Semana	Sábado	Domingo	Dia de Semana	Sábado	Domingo
HC	12	7	-	14	7	-
P	5	-	-	3	-	-
V	3	13	20	3	13	20
SV	4	4	4	4	4	4

Relativamente aos custos de eletricidade obtidos para um ciclo que dure 175 hora (ciclo normal), 139 horas (tempo do ensaio experimental) e 127 horas (ciclo otimizado), estes podem ser consultados na Tabela C.3, Tabela C.4 e Tabela C.5 respetivamente.

Tabela C.3 - Custos de eletricidade para um ciclo normal (175 horas).

Custo Eletricidade (€/Ciclo)		
Ciclo Normal (175 h)	Inverno	Verão
Semana (2ª a 6ª) (Início 12h)	45,99	45,86
Sábado	9,14	9,14
Domingo	8,48	8,48
Semana (Segunda) (Fim 18h)	6,30	4,74
Total (€/Ciclo)	69,91	68,21

Tabela C.4 - Custos de eletricidade para o ensaio experimental (139 horas).

Custo Eletricidade (€/Ciclo)		
Ciclo Ensaio Experimental (139 h)	Inverno	Verão
Sábado (Início às 13h)	4,22	-
Domingo	8,48	-
Semana (2ª a 5ª)	40,58	-
Sexta (Fim às 8h)	2,91	-
Total (€/Ciclo)	56,19	-

Tabela C.5 - Custos de eletricidade para o ciclo otimizado (127 horas).

Custo Eletricidade (€/Ciclo)		
Ciclo Otimizado (127 h)	Inverno	Verão
Semana (2ª a 6ª) (Início 12h)	45,99	45,86
Sábado (Fim às 18h)	6,68	6,83
Total (€/Ciclo)	52,67	52,68

D. Dados utilizados para os cálculos

Neste anexo encontra-se os valores comuns tabelados que foram utilizados para a realização dos balanços de massa, energia e para o cálculo das perdas de energia.

Na Tabela D.1 encontram-se algumas propriedades referentes ao ar, vapor de água, água no estado líquido e gesso, usadas nos balanços de massa e energia.

Tabela D.1 - Dados utilizados para a realização de cálculos.

Ar - Vapor de Água - Água Líquida - Gesso	
P_{Ar} (Bar)	1,0
cp_{Ar} (kJ/kg.K)	1,01
MM_{Ar} (kg/kmol)	28,97
R_{Ar} (atm.m ³ /kmol.K)	0,082
cp_{VH_2O} (kJ/kg.K)	1,9
λ_{VH_2O} (kJ/kg)	2500,9
cp_{H_2O} (kJ/kg.K)	4,18
cp_{Gesso} (kJ/kg.K)	1,5
E (Excesso Ar Comb.) (%)	15

Relativamente ao cálculo das perdas de energia foram utilizados os valores apresentados na Tabela D.2.

Tabela D.2 - Dados utilizados para os cálculos das perdas de energia.

Cálculo das Perdas	
K_{Parede} (W/m.K)	0,8
g (m/s ²)	9,8
$T_{amb.}$ (Ensaio Exper.) (°C)	18,0
T_1 (Ensaio Exper.) (°C)	51,63
K_{Ar} (W/m.K)	0,0257
ρ_{Ar} (kg/m ³)	1,2
$K_{Celotex}$ (W/m.K)	0,022
Pr	0,713
A_s (m ²)	25,08
Δx (m)	0,085
σ (W/m ² .K ⁴)	5,67E-08
ϵ	0,85

E. Carta psicométrica

Como já foi referido no capítulo 2, foi necessário recorrer a uma carta psicométrica de forma a retirar a humidade específica do ar, para a realização dos cálculos dos balanços de energia. Na Figura E.1 encontra-se a carta psicométrica utilizada para retirar os respetivos valores.



PSYCHROMETRIC CHART

NORMAL TEMPERATURES

SI METRIC UNITS

Barometric Pressure 101,325 kPa

SEA LEVEL

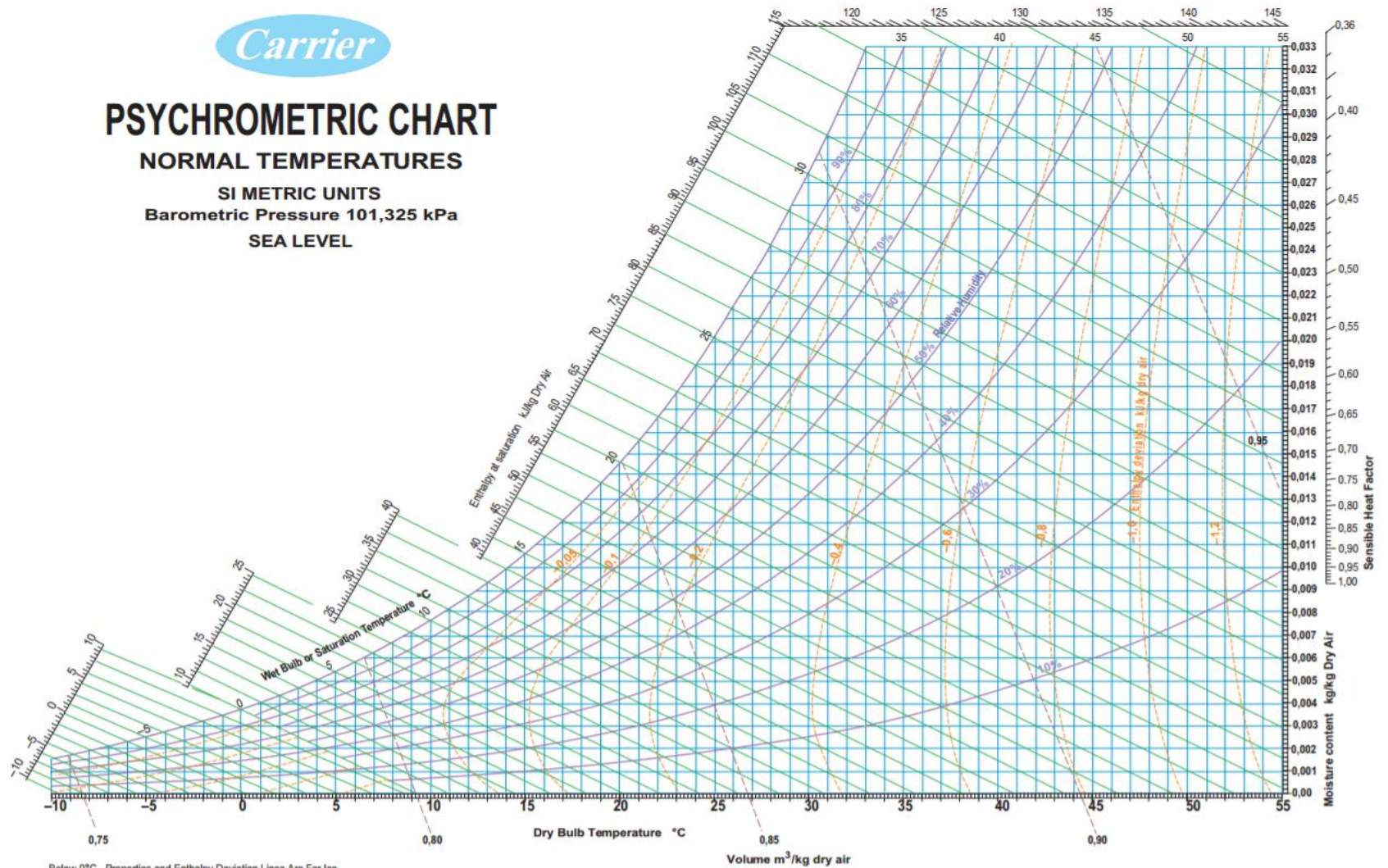


Figura E.1 - Carta psicométrica utilizada.

F. Estudo da curva de secagem

De forma a compreender o comportamento do gesso num processo de secagem, recorreu-se a um estudo efetuado pela Dr^a. Liliana Sousa – responsável pelo departamento de controlo da qualidade, ambiente e segurança da empresa ARCH Valadares.

O estudo referido foi realizado em escala laboratorial, sendo que foram preparadas amostras de gesso com uma composição semelhante à utilizada na preparação dos moldes (mesmas porções de água e gesso). As respetivas amostras foram reencaminhadas para uma estufa de secagem “laboratorial”, simulando um ambiente similar ao das estufas de secagem “industrial”, atingindo temperaturas entre os 60-50°C, como acontece no programa estipulado para a secagem dos moldes.

Na Figura F.1 encontra-se representado os resultados obtidos no referido estudo.

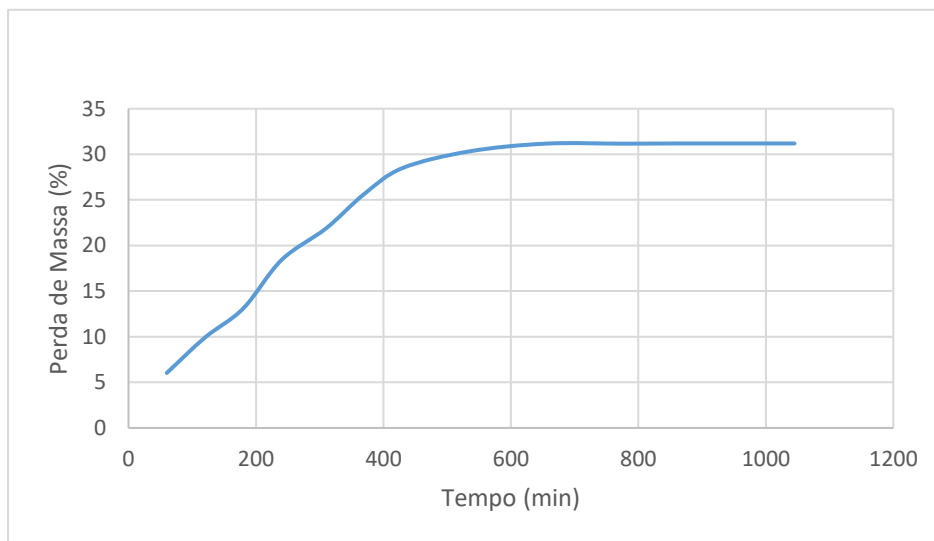


Figura F.1 - Curva de secagem do gesso.

Como se pode constatar na Figura E.1, ao longo do tempo, para a temperatura do ensaio, a perda de massa (água) tende a estabilizar nos 31%, concluindo que a essas condições de secagem, a perda de água não ultrapassará esse valor. Este estudo acaba por permitir um melhor acompanhamento da secagem dos moldes, sabendo que ao atingir uma perda de massa que ronde os 30%, esse valor manter-se-á constante ao longo do tempo. Assim sendo, todo o tempo em que os moldes permaneçam no ciclo de secagem após atingidos os 30% de perda de massa, é considerado tempo desnecessário, estando a gastar energia desnecessariamente.

G. Exemplos de cálculo

Neste anexo encontram-se exemplos de cálculo dos balanços de massa e energia efetuados para o ensaio experimental, bem como as perdas de energia verificadas pela parede lateral da estufa.

➤ Balanços de massa e energia:

Após a obtenção do caudal de gás natural necessário para um ciclo normal de 175 horas (745,98 kg/Ciclo), como está referido no subcapítulo 4.1, pode-se determinar o caudal de gás natural necessário para satisfazer as necessidades do ensaio experimental, que durou cerca de 139 horas. Na equação seguinte encontra-se o cálculo efetuado.

$$\dot{m}_{GN\text{ Ensaio Ex.}} = \frac{\dot{m}_{GN\text{ Ciclo Normal}} \times t_{\text{Ensaio Ex.}}}{t_{\text{Ciclo Normal}}} = \frac{745,98 \times 139}{175} = 592,52 \left(\frac{kg}{Ciclo} \right) \quad (G.1)$$

Relativamente ao caudal dos gases de exaustão, como na altura em que foi realizado o ensaio experimental verificaram-se fugas de ar pelas portas da estufa, essa quantidade de ar tem de ser adicionada ao caudal determinado na Tabela 4.7, como se encontra na seguinte equação:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Gases\text{ Ex.Hum.}} &= \dot{m}_{Gases\text{ Ex.Hum. S/Fugas}} + \dot{m}_{Fugas\text{ Ar}} = 387761,41 + 167062,68 \\ &= 554824,02 \left(\frac{kg}{Ciclo} \right) \end{aligned} \quad (G.2)$$

Para determinar o caudal de ar de combustão recorre-se a seguinte equação, usando um excesso de ar de 15%:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{Ar\text{ Comb.}} &= \frac{\dot{m}_{GN}}{MM_{GN}} \times \left(\frac{n_{Ar}}{n_{comb.}} \right)_{Est.} \times MM_{Ar} + \left(\frac{\dot{m}_{GN}}{MM_{GN}} \times \left(\frac{n_{Ar}}{n_{comb.}} \right)_{Est.} \times MM_{Ar} \right) \times E_{Ar} \\ &= \frac{592,52}{18,32} \times 10,74 \times 28,9 + \left(\frac{592,52}{18,32} \times 10,74 \times 28,9 \right) \times 0,15 \\ &= 11574,66 \left(\frac{kg}{Ciclo} \right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

De forma a determinar o caudal de ar fresco recorre-se ao balanço global de massa, sendo que as quantidades de massa de água dos moldes secos e húmidos foram

determinadas através das pesagens dos moldes e das percentagens dos seus constituintes ($\dot{m}_{H_2O \text{ Moldes Secos}}=2477,02$ e $\dot{m}_{H_2O \text{ Moldes Hum.}}=6394,71$ kg/Ciclo).

$$\begin{aligned}\dot{m}_{Ar F.} &= \dot{m}_{Gases \text{ Ex. Hum.}} + \dot{m}_{H_2O \text{ Moldes Secos}} - \dot{m}_{Ar \text{ Comb.}} - \dot{m}_{GN} - \dot{m}_{H_2O \text{ Moldes Hum.}} \\ &= 554824,02 + 2477,02 - 11574,66 - 592,52 - 6394,71 \\ &= 538739,21 \left(\frac{kg}{Ciclo} \right)\end{aligned}\quad (4.3)$$

Realizados os balanços de massa torna-se necessário passar as correntes de ar húmido para correntes de ar seco, possibilitando a realização dos balanços de energia. Na equação 4.4 encontra-se um exemplo para a corrente de ar fresco, cuja a humidade específica encontrava-se a 0,0088 kg/kg de ar seco, valor este que foi obtido através da consulta da carta psicrométrica utilizando o valor médio da humidade relativa, 37,73%, e da temperatura média, 27,92°C.

$$\dot{m}_{Ar F. \text{ Seco}} = \frac{\dot{m}_{Ar F.}}{(1 + Y_{esp})} = \frac{538739,21}{(1 + 0,0088)} = 534039,66 \left(\frac{kg}{Ciclo} \right)\quad (4.4)$$

Para as outras correntes de ar que apresentam um teor de humidade deve ser efetuado o mesmo cálculo para as respetivas temperaturas e humidades relativas.

Com os caudais das correntes de ar seco calculadas, torna-se possível o cálculo das entalpias. Na equação 4.8 encontra-se um exemplo de cálculo para a corrente de ar fresco, sendo que para as restantes correntes de ar efetua-se o mesmo cálculo.

$$\begin{aligned}h_{Ar F.} &= cp_{Ar} \times (T_{Ar F.} - T_{Ref}) + Y_{Esp \text{ Ar F.}} \times [cp_{VH_2O} \times (T_{VH_2O} - T_{Ref}) + \lambda_{VH_2O}^{TRef}] \\ &= 1,01 \times (300,92 - 273) + 0,0088 \times [1,9 \times (300,92 - 273) + 2500,9] \\ &= 50,67 \left(\frac{kJ}{kg} \right)\end{aligned}\quad (4.8)$$

Obtidas as entalpias e os caudais das correntes de ar, calcula-se a energia de cada corrente como na equação 4.7.

$$H_{Ar F.} = \dot{m}_{Ar F. \text{ Seco}} \times h_{Ar F.} = 534039,66 \times 50,67 = 2,71 \times 10^7 \left(\frac{kJ}{Ciclo} \right)\quad (4.7)$$

Tendo em conta o caudal mássico de gás natural, as suas propriedades físicas e a definição de uma temperatura de referência, torna-se possível calcular o caudal térmico de gás natural através da equação 4.9.

$$\begin{aligned}
 H_{GN} &= \dot{m}_{GN} \times PCI_{GN} + \dot{m}_{GN} \times cp_{GN} \times (T_{GN} - T_{Ref}) \\
 &= 592,52 \times 48282,83 + 592,52 \times 2,1 \times (284 - 273) \\
 &= 2,86 \times 10^7 \left(\frac{kJ}{Ciclo} \right)
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Relativamente à energia térmica transportada pelos moldes, tanto à entrada para à estufa (moldes húmidos), como à saída da mesma (moldes secos), o calculo é efetuado recorrendo à equação 4.14, variando apenas a massa de água dos moldes ($\dot{m}_{H_2O \text{ Moldes Secos}}=2477,02$ e $\dot{m}_{H_2O \text{ Moldes Hum.}}=6394,71$ kg/Ciclo) e as respetivas temperaturas ($T_{\text{Moldes Secos}}=51,63^\circ\text{C}$ e $T_{\text{Moldes Húm.}}=18^\circ\text{C}$). No caso da massa de gesso, no processo de secagem esta não varia, correspondendo a $\dot{m}_{\text{Gesso}}=8952,48$ kg/Ciclo em ambos os casos.

$$\begin{aligned}
 H_{\text{Moldes s.}} &= (\dot{m}_{\text{Gesso}} \times cp_{\text{Gesso}} + \dot{m}_{H_2O \text{ Moldes Secos}} \times cp_{H_2O}) \times (T_{\text{Molde}} - T_{\text{Ref}}) \\
 &= (8952,48 \times 1,5 + 2477,02 \times 4,18) \times (324,63 - 273) \\
 &= 1,23 \times 10^6 \left(\frac{kJ}{Ciclo} \right)
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Obtidas as energias de todas as correntes, recorre-se ao balanço global de energia de forma a calcular o valor de perdas envolvidas no processo. Na equação 4.6 encontra-se um exemplo de cálculo do balanço global de energia do ensaio experimental.

$$\begin{aligned}
 q_P &= H_{\text{Gases Ex.Hum.}} + H_{\text{Moldes Secos}} - (H_{GN} + H_{Ar \text{ Comb.}} + H_{Ar \text{ F.}} + H_{\text{Moldes Hum.}}) \\
 &= 5,36 \times 10^7 + 1,23 \times 10^6 - (2,86 \times 10^7 + 5,81 \times 10^5 + 2,71 \times 10^7 + 7,23 \times 10^5) \\
 &= -2,12 \times 10^6 \left(\frac{kJ}{Ciclo} \right)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

➤ Cálculo das perdas pela parede lateral:

Como referido anteriormente, efetuou-se o calculo das perdas de energias verificadas na parede lateral da estufa e do teto da mesma. Como exemplo de cálculo encontra-se o procedimento para a obtenção das perdas de energia pela parede lateral,

para o ensaio experimental, sendo que para o teto efetua-se com as mesmas bases de cálculo.

Como não foi possível medir a temperatura exterior da parede lateral, foi necessário recorrer a um processo iterativo começando por arbitrar $T_2=40^\circ\text{C}$.

Posto isto, calcula-se a temperatura média de forma a calcular o β , como se encontra a seguir.

$$T_{Méd} = \frac{T_2 + T_{amb}}{2} = \frac{40 + 18}{2} = 29 + 273 = 302 \text{ K} \quad (4.19)$$

$$\beta = \frac{1}{T_{Méd}} = \frac{1}{302} = 0,0033 \text{ K}^{-1} \quad (G. 3)$$

Obtidos todos os valores necessários, calcula-se o número de Rayleigh (Ra_L), como se encontra a seguir.

$$Ra_L = \frac{g \times \beta \times (T_2 - T_{Amb}) \times L^3 \times \rho^2}{\mu^2} \times Pr = \frac{9,8 \times 0,0033 \times (40 - 18) \times 4^3 \times 1,2^2}{1,51 \times 10^{-5}^2} \times 0,713 = 2,05 \times 10^{11} \quad (4.17)$$

Calculado o número de Rayleigh, calcula-se o numero de Nusselt, como está exemplificado a seguir.

$$Nu = \left(0,825 + \frac{0,387 \times Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = \left(0,825 + \frac{0,387 \times 2,05 \times 10^{11 \frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{0,713} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 = 663,26 \quad (4.15)$$

Com o número de Nusselt obtido, torna-se possível calcular o valor do coeficiente de convecção do ar.

$$Nu = \frac{h_{Conv} \times L}{K_{Ar}} \leftrightarrow h_{Conv} = \frac{Nu \times K_{Ar}}{L} = \frac{663,26 \times 0,0257}{4} = 4,26 \left(\frac{W}{m^2 \times K} \right) \quad (4.16)$$

Após o cálculo do coeficiente de convecção, calcula-se o verdadeiro valor de T_2 (temperatura exterior da parede), através da correlação das transferências de calor por condução, convecção e radiação, como se encontra exemplificado a seguir.

$$q_{Cond} = q_{Conv} + q_{Rad} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} K_{Parede} \times A_S \times \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} &= h_{Conv} \times A_S \times (T_2 - T_{Amb}) + \sigma \times \varepsilon \times A_S \times (T_2^4 - T_{Amb}^4) \\ \Leftrightarrow 0,8 \times 25,08 \times \frac{(51,63 - T_2)}{0,085} & \\ &= 4,26 \times 25,08 \times (T_2 - 18) + 5,67 \times 10^{-8} \times 0,85 \times 25,08 \times (T_2^4 - 18^4) \\ \Leftrightarrow T_2 &= 41,14 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Com o verdadeiro valor de T_2 calculado, é possível calcular as perdas de energia por transferência de calor pela parede lateral, para o ensaio experimental cujo tempo de ciclo durou 139 horas.

$$\begin{aligned} Q_{Cond} &= K_{Parede} \times A_S \times \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} = 0,8 \times 25,08 \times \frac{51,63 - 41,14}{0,085} \\ &= 2476,13 \times 10^{-3} \times 3600 \times 139 = 1,24 \times 10^6 \left(\frac{kJ}{Ciclo} \right) \end{aligned} \quad (4.25)$$