



Universidade de Aveiro  
Ano 2014

Departamento  
Ordenamento

de Ambiente e

**Luís Carlos Dias  
Fernandes**

**Análise energética em central fixa de produção de  
massas asfálticas**





**Luís Carlos Dias  
Fernandes**

**Análise energética em central fixa de produção de  
massas asfálticas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor Fernando Neto, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



“O nosso lugar é o caminho.”

Carlos Maria Antunes



## **o júri**

### **presidente**

**Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho**

Professor Auxiliar, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio**

Professor Associado, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva**

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

No estudo efetuado, apesar de representar uma grande exigência a nível individual, sem o apoio e o auxílio de alguns intervenientes não seria possível atingir o objetivo proposto. Deste modo quero agradecer às entidades e principalmente às pessoas que possibilitaram a realização do estudo.

Assim sendo, estou extremamente agradecido:

Pela oportunidade de integração no programa *GALP202020* e pela oportunidade de integração empresarial por parte da GALP.

Pela disponibilidade, paciência e ensinamentos ministrados durante a realização do estudo por parte do Eng. Alfredo Amaral, na Prioridade – *Vias de Comunicação, S.A.*.

Pela orientação, disponibilidade e conhecimento fornecido durante a realização do estudo por parte do meu orientador, Prof. Doutor Fernando Neto da Universidade de Aveiro.

Aos meus Pais, Namorada, Irmão e Amigos.

Agradeço por último, mas não menos importante, a todos os que por forma direta ou indireta se cruzaram durante a realização do trabalho desenvolvido.



**palavras-chave**

Análise Energética, Eficiência Energética, Produção de massas asfálticas, modelo térmico

**resumo**

O consumo energético nas indústrias é algo que tem de ser monitorizado, avaliado e orientado, visando a eficiência energética e sustentabilidade, de modo não só a reduzir o consumo de combustíveis fósseis, mas também a auxiliar a redução da fatura económica.

O presente trabalho teve como principal objetivo uma análise energética, e incorpora a caracterização térmica dos materiais utilizados na indústria de produção de massas asfálticas, e o desenvolvimento de um modelo térmico que preveja o comportamento dos mesmos, na produção de massas asfálticas, em central fixa com incorporação de material reciclado a frio.

Primariamente o estudo passou pela análise dos consumos energéticos da instalação, caracterizando-a segundo o Decreto-lei 71/2008, de 15 de Abril, tendo-se constatado, que o consumo de gás natural se evidencia como uma das principais fontes de energia e um dos principais responsáveis pela emissão de GEE (Gases de Efeito de Estufa). Posteriormente o consumo de gás natural foi distribuído pelos pontos consumidores, o cilindro exsiccador e a caldeira de aquecimento de óleo térmico. O cilindro exsiccador é o principal consumidor energético, com um consumo próximo de 90% do gás natural total.

Seguidamente foi realizada uma caracterização dos materiais utilizados na produção de massas asfálticas segundo o *DSC (Differential Scanning Calorimetry)*. Os materiais analisados foram o reciclado/fresado, o calcário, o pó de calcário, o seixo, a areia e o granito. Os resultados dos materiais secos demonstraram que o material com maior *cp* (calor específico) foi a areia e o menor o calcário. Nos resultados dos materiais saturados observou-se que o seixo apresenta maior facilidade de remoção de humidade e o reciclado/fresado apresenta menor.

Por último, foi realizado um modelo térmico com utilização de um balanço mássico e energético ao processo de secagem e sobreaquecimento dos agregados no cilindro exsiccador.

Conclui-se que as principais influências no consumo de gás natural, na produção de massas asfálticas com inclusão de material reciclado a frio, são: a necessidade energética de aquecimento em função da temperatura a obter, e a energia necessária para remover o conteúdo em humidade presente nos diversos materiais (fresado e agregados).



**keywords**

Energy Analysis, Energy Efficiency, Production asphalt masses, thermal model

**abstract**

The energy consumption in industry is something that must be monitored, evaluated and oriented, improving efficiency and sustainability in order not only to reduce the consumption of fossil fuels, but also to help reduce the economic bill.

This study aims an energy analysis, and incorporates the thermal characterization of materials used in asphalt mass production industry, and the development of a thermal model that predicts the behavior of the same in the production of asphalt masses in central fixed incorporating cold recycled material.

Primarily the study began by analyzing the energy consumption of the installation, characterizing it according to Decree Law 71/2008, of 15 April, having found that the consumption of natural gas is evidenced as a major source of energy and major contributor to the emission of GHG (Greenhouse Gases). Later, the consumption of natural gas was distributed to the consumers points, the dryer cylinder and the boiler thermal oil heating. The dryer cylinder is the main energy consumer, with a consumption of around 90% of total natural gas.

Then, a material characterization was performed asphalt used in the production of asphalt masses according to the DSC (Differential Scanning Calorimetry). The materials analyzed were recycled material, limestone, limestone powder, pebble, sand and granite. The results of the dried material showed that the material that has greater  $cp$  (specific heat) was sand and limestone the lowest. In the results of the saturated materials it was observed that the pebble has the greater ease of removal of water content and the recycle material presents less.

Finally it was performed a thermal model using a mass and energy balance to the process of drying and overheating the aggregates in the desiccator cylinder.

We conclude that the main influences on natural gas consumption in the production of asphalt masses with inclusion of cold recycled material, are the energy requirement depending on the heating temperature to obtain, and the energy required to remove the moisture content at the various materials (recycled and aggregates).



# Índice

ÍNDICE DE FIGURAS .....	III
ÍNDICE DE TABELAS .....	V
ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	VII
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 ENQUADRAMENTO .....	1
1.2 POLÍTICA ENERGÉTICA EM PORTUGAL PARA A INDÚSTRIA.....	3
1.3 OBJETIVO E OBJETO DE ESTUDO.....	5
1.4 ESTRUTURA DO RELATÓRIO .....	5
CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO DE TÉCNICAS E TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS EM CENTRAL FIXA – “HMA” .....	7
2.1 Modelo base de produção de massas asfálticas em central fixa (Processo Descontínuo).....	8
2.1.1 PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS COM INCLUSÃO DE MATERIAL A RECICLAR A FRIO .....	9
2.1.2 PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS COM INCLUSÃO DE MATERIAL A RECICLAR A QUENTE .....	9
2.1.3 PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS POR RECYCLEAN .....	10
2.1.4 PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS EM CENTRAL (TORRE).....	10
2.2 Modelo de produção de central fixa de massas asfálticas (Processo Contínuo) .....	11
2.2.1 PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS POR ALIMENTAÇÃO SEPARADA.....	11
2.2.2 PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS DE DUPLO INVÓLUCRO .....	12
2.2.3 PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS DE FLUXOS CONTRACORRENTE .....	13
2.3 Descrição de técnicas e tecnologias para produção de massas asfálticas em central fixa – “WMA” .....	13
CAPÍTULO III - EMPRESA EM ESTUDO.....	17
3.1 Identificação da empresa .....	17
3.2 Caracterização energética .....	17
3.3 Descrição do processo produtivo da instalação .....	19
3.3.1 Diagrama de operação da Instalação em Análise.....	20

3.3.2	Características técnicas da instalação .....	23
CAPÍTULO IV - ABORDAGEM TEÓRICA E METODOLÓGICA .....		25
4.1	Caracterização Energética da Instalação;.....	25
4.2	Distribuição dos consumos de gás natural.....	27
4.3	Estudo de funcionamento do cilindro exsicador (processo descontínuo); .....	28
4.4	Balanço mássico e energético ao cilindro exsicador.....	29
4.5	Análise aos calores específicos dos agregados que compõem as misturas de massas asfálticas via DSC; .....	36
4.6	Realização de um modelo térmico teórico .....	41
4.7	Estudo da viabilidade de substituição da caldeira de aquecimento de óleo térmico.....	45
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....		49
5.1	Caracterização Energética da Instalação;.....	49
5.2	Distribuição dos consumos de gás natural.....	50
5.3	Estudo de funcionamento do cilindro exsicador (processo descontínuo); .....	52
5.4	Análise aos calores específicos dos agregados que compõem as misturas de massas asfálticas via DSC; .....	54
5.5	Análise aos calores específicos dos agregados que compõem as misturas de massas asfálticas via DSC; .....	55
5.6	Realização de um modelo térmico teórico com utilização do Balanço mássico e energético ao cilindro exsicador.....	57
5.7	Estudo da viabilidade de substituição da caldeira de aquecimento de óleo térmico.....	69
CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....		71
CAPÍTULO VII - BIBLIOGRAFIA.....		75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia final por sector em 2012.....	2
Figura 2 - Configuração de central de produção de asfalto.....	8
Figura 3 - Método Central de produção com recurso a RAP a frio.....	9
Figura 4 - Método RAP a quente.....	10
Figura 5 - Método "Recycling ring" .....	10
Figura 6 - Método de produção de massas asfálticas por central de torre.....	11
Figura 7 - Modelo de central de produção de massas asfálticas por alimentação separada .....	12
Figura 8 – Modelo de produção de massas asfálticas pelo método de duplo tambor .....	12
Figura 9 - Modelo de produção de massas asfálticas de fluxos contracorrentes .....	13
Figura 10 - Exemplo de aplicação de técnica de formação de espuma .....	15
Figura 11 – Consumo de gás natural associado à produção massas asfálticas em 2013 .....	18
Figura 12 – Fluxograma produtivo de massas asfálticas da Prioridade .....	20
Figura 13 - Imagem representativa do cilindro exsiccador .....	29
Figura 14 – Tratamento de amostras analisadas (via húmida).....	38
Figura 15 - imagem comparativa do cadinho do DSC.....	38
Figura 16 - Funcionamento de um DSC .....	39
Figura 17 - Página inicial do modelo térmico.....	42
Figura 18 - Página do modelo para a massa.....	43
Figura 19 - Página do modelo para a energia .....	43
Figura 20 – Descrição de processo de conversão de Biomassa.....	45
Figura 21 - Tipos de conversão de biomassa .....	46
Figura 22 - Imagem do software de apoio ao estudo da caldeira.....	47
Figura 23 – Consumo Específico vs. Produção de massas fabricadas.....	52
Figura 24 - Funcionamento vs. Arranques vs. Consumo Específico .....	53
Figura 25 – Determinação calor específico (via seca).....	54
Figura 26 - Determinação de calor específico (via húmida) .....	56
Figura 27 - Exemplo de modelação de uma mistura .....	66
Figura 28 - Exemplo de modelação para a massa .....	67

Figura 29 - Exemplo de modelação para a energia..... 68

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de consumos e custos energéticos.....	19
Tabela 2 - Indicadores Energéticos.....	19
Tabela 3 - Especificidades técnicas da central.....	23
Tabela 4 - Determinação de consumos energéticos (gasóleo) .....	25
Tabela 5 - Descrição da conversão da energia elétrica .....	26
Tabela 6- distribuição dos consumos de gás natural .....	26
Tabela 7 - Determinação de funcionamento do cilindro exsicador .....	27
Tabela 8 - Determinação de funcionamento da caldeira de aquecimento de óleo térmico .....	27
Tabela 9 – Composição dos efluentes gasosos .....	30
Tabela 10 – Composição Molar de Gás natural seco distribuído em Portugal	32
Tabela 11 - Teores ponderais mássicos correspondentes a cada elemento químico.....	33
Tabela 12 – Algumas características dos agregados analisados.....	37
Tabela 13 - Imagens dos materiais analisados .....	37
Tabela 14 - Massa das amostras analisadas DSC – Via Húmida .....	39
Tabela 15 - Determinação de cp .....	39
Tabela 16 - Massa das amostras analisadas DSC - Via Seca .....	40
Tabela 17 - Calores Específicos de algumas substâncias a 20 °C e Pressão atmosférica.....	40
Tabela 18 - Valores utilizados para determinação de custos de produção de massas asfálticas.....	44
Tabela 19 - caracterização conversão biomassa sólida .....	46
Tabela 20 - Características da caldeira de substituição .....	48
Tabela 21 - Dados iniciais RETscreen .....	48
Tabela 22 - Dados energéticos RETscreen.....	48
Tabela 23 – Medições energéticas realizadas à caldeira de aquecimento térmico .....	50
Tabela 24 - Funcionamento típico do cilindro exsicador.....	51
Tabela 25 - Tabela de funcionamento semanal típico da instalação.....	51
Tabela 26 - consumo típico diário da instalação .....	52
Tabela 27 - Equações obtidas através da Figura 25 .....	55

Tabela 28 – Exemplo de misturas e previsões de consumos para produção de massas asfálticas (100 ton.) com humidade determinada em laboratório.	59
Tabela 29 – Resultados obtidos da humidade determinada em laboratório.....	61
Tabela 30 - Exemplo de previsões de consumos para produção de massas asfálticas (100 ton.) com diferentes teores de humidade .....	63
Tabela 31 - Resumo resultados .....	69

# ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

## Abreviaturas

ADENE	Agência para a Energia
CE	Comunidade Europeia
<i>DSC</i>	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
ENE2020	Estratégia Nacional para a Energia
GEE	Gases de Efeito de Estufa
<i>HMA</i>	<i>Hot Mix Asphalt</i>
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
PREn	Plano Racionalização de consumos de Energia
SGCIE	Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia
VAB	Valor Atualizado Bruto
<i>WMA</i>	<i>Warm Mix Asphalt</i>

## Símbolos e Unidades

C	Carbono	-
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etano	-
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propano	-
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Butano	-
ca	Calor específico da mistura de agregados	$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
CEE	Consumo Específico de Energia	$\text{kgep ton}^{-1}$
$c_f$	Calor específico do fresado	$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
CH <sub>4</sub>	Metano	-
CO	Monóxido de Carbono	-
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono	-
$c_p$	Calor específico	$\text{kJ kg}^{-1}\text{k}^{-1}$
$c_{p\text{H}_2\text{O}}$	Calor específico da água	$\text{kJ kg}^{-1}\text{k}^{-1}$
H	Hidrogénio	-
H <sub>2</sub>	Hidrogénio molecular	-
H <sub>2</sub> O	Água	-

IC	Intensidade Carbónica	tonCO <sub>2</sub> tep <sup>-1</sup>
IE	Intensidade Energética	kgep € <sup>-1</sup>
kg	Quilograma	-
kgCO <sub>2</sub>	Quilograma de Dióxido de Carbono	-
kgep	Quilograma equivalente de petróleo	-
kJ	kilojoule	-
kW	Kilowatt	-
L <sub>v</sub>	Calor latente de evaporação da água	kJ kg <sup>-1</sup>
M <sub>A</sub>	Massa Molar do ar seco	kg kmol <sup>-1</sup>
m <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Massa de água	kg
MJ	Megajoule	-
M <sub>j</sub>	Massa molar de cada elemento químico	kg kmol <sup>-1</sup>
M <sub>O<sub>2</sub></sub>	Massa Molar do oxigénio	kg kmol <sup>-1</sup>
MWh	Megawatt - hora	-
N	Azoto	-
N <sub>2</sub>	Azoto Molecular	-
n <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Número de moles de Dióxido de carbono	kmol
n <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Número de moles de água	kmol
Nm <sup>3</sup>	Metro cúbico normalizado (PTN)	-
n <sub>N<sub>2</sub></sub>	Número de moles de azoto	kmol
n <sub>O<sub>2</sub></sub>	Número de moles de oxigénio	kmol
n <sub>SO<sub>2</sub></sub>	Número de moles de Dióxido de Enxofre	kmol
O	Oxigénio	-
O <sub>2</sub>	Oxigénio Molecular	-
PCI	Poder calorífico Inferior	MJ kg <sup>-1</sup>
PCS	Poder calorífico Superior	kWh m <sup>-3</sup>
S	Enxofre	-
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre	-
T	Temperatura	K, °C
tCO <sub>2</sub>	Tonelada de dióxido de carbono	-
tep	Tonelada equivalente de Petróleo	-
TF	Temperatura inicial do fresado	°C
T <sub>i</sub>	Temperatura de fornecimento de gás natural	°C

$T_m$	Temperatura final pretendida da mistura	°C
ton	Unidade de tonelada	-
$T_{out}$	Temperatura de fornecimento do ar ao queimador	°C
$w_a$	Oxigénio presente na mistura	-
$w_{CF}$	Teor ponderal seco da fração orgânica do Carbono	kg C/kg Combustível
$w_{HF}$	Teor ponderal seco da fração orgânica do Hidrogénio	kg H/kg Combustível
$W_{j,f}$	Quantidade de cada elemento químico no combustível	kg
$w_{NF}$	Teor ponderal seco da fração orgânica do Azoto	kg N/kg Combustível
$w_{OF}$	Teor ponderal seco da fração orgânica do Oxigénio	kg O/kg Combustível
$w_s$	Oxigénio estequiométrico de combustão	-
$w_{SF}$	Teor ponderal seco da fração orgânica do Enxofre	kg S/kg Combustível
$w_{VA}$	Razão mássica de vapor de água no ar de combustão	kg $H_2O$ /kg ArSeco
$w_{WF}$	Razão mássica da humidade no combustível	kg $H_2O$ /kg Combustível
$w_{ZF}$	Teor ponderal seco de cinzas	kg Z/kg Combustível
$Y_{s,j}$	Coefficiente estequiométrico de cada elemento Químico no combustível	-
$\omega$	Humidade do fresado	%



---

# CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

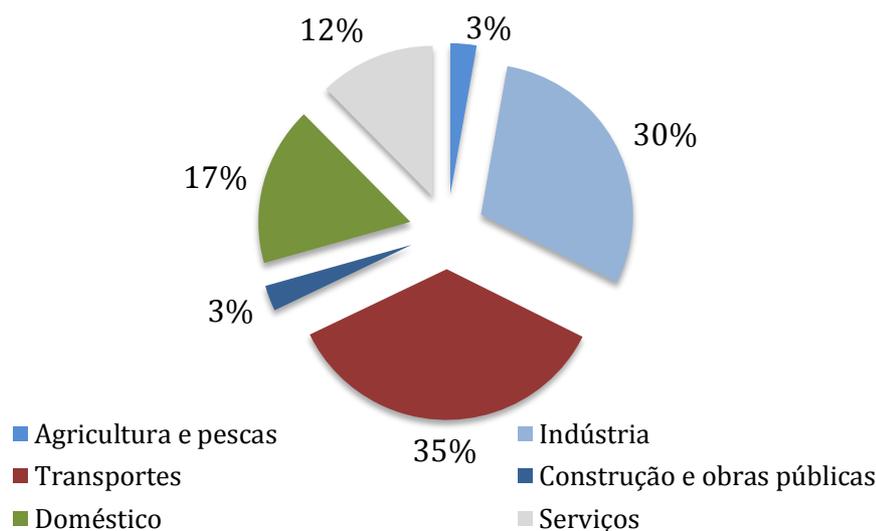
## 1.1 Enquadramento

O elevado desenvolvimento das populações mundiais, como tem vindo a ser demonstrado ao longo dos anos, assentou essencialmente em recursos energéticos não renováveis (combustíveis fósseis). Este elevado crescimento trouxe consigo problemas graves e impactes prejudiciais para o meio ambiente, que afetam diariamente as populações mundiais. Um dos grandes problemas identificados é a emissão de Gases com Efeito de Estufa (GEE). Embora este seja um fenómeno natural, que ocorre na terra de forma a manter o equilíbrio entre a fauna, a flora, as condições climáticas, entre outros, a emissão causa a destruição da camada do ozono e, conseqüentemente, o aumento da temperatura, a fusão dos calotes polares, a destruição de ecossistemas, destabilizando esse equilíbrio e a contribuição em grande escala para as catástrofes ambientais.

No seguimento da evidência apresentada, foi criado o Protocolo de Quioto, primeiro documento internacional que limita as emissões dos GEE nos países desenvolvidos, com o objetivo de proteger o ambiente e a saúde humana (Chazournes, 1998). Este Protocolo sofreu algumas reformulações ao longo dos anos. Na conferência de Doha em 2013 ficou estipulado o objetivo para 2020 acordando a contínua redução das emissões de GEE em 37 países, representando 15% das emissões mundiais (*Protocolo de Quioto*, [s.d.]).

Face à crescente dependência energética, requerida pelas populações para satisfazer as necessidades diárias, e para auxiliar o cumprimento do protocolo de Quioto, a CE (Comunidade Europeia) teve necessidade de controlar e minimizar os consumos energéticos, tornando mais eficiente a sua utilização através de regulamentações que contribuam, não só reduzir os consumos energéticos, mas também, para minimizar os impactes ambientais associados à utilização destes recursos (*Diretiva 2012/12/UE*, 2012).

As regulamentações emitidas pela CE foram estendidas a todos os sectores consumidores de energia, nomeadamente os transportes, a indústria, os serviços, a agricultura e pescas, a construção e obras públicas, e o sector doméstico.



**Figura 1 - Consumo de energia final por sector em 2012 (INE, 2012)**

Portugal encontra-se abrangido pelo Protocolo de Quioto e, desta forma, tem por objetivo reduzir as suas emissões de GEE, comprometendo-se a reduzir os consumos energéticos. Para isso desenvolveu ferramentas, como o exemplo do PNAEE e do PNAER, para auxiliar e maximizar a redução dos consumos energéticos, de forma a atingir os objetivos definidos no quadro das metas europeias: de redução de 20% de emissões de GEE, até 2020, aumentar em 20% a produção de energia através de fontes renováveis, até 2020, e reduzir em 20% o consumo de energia primária, através de medidas de eficiência energética (*Resolução do Conselho de Ministro de n.º 20/2013 de 10 de abril, 2013*).

A indústria portuguesa tem uma elevada responsabilidade no panorama energético nacional, representando 30% dos consumos energéticos do País (**Figura 1**). Associado a este facto, e inerentemente ao seu funcionamento, estão as emissões dos GEE. A indústria representa, desta forma, um potencial alvo de incidência no que concerne à redução de consumos e consequente minimização das emissões dos gases poluentes para a atmosfera, tendo como resultado, quer um benefício económico e ambiental, minimizando a fatura energética a pagar, quer a redução das emissões dos GEE, valorizando a empresa no seu papel social, nomeadamente contribuindo para que Portugal atinja os objetivos propostos.

Face à conjuntura económica e política em Portugal, as próprias empresas exigem a si mesmo a redução dos consumos, com o intuito de se tornarem mais eficientes energeticamente na produção dos seus produtos.

No desenvolvimento do País tem sido dada elevada relevância às vias de comunicação. Desde 1985, quando foi criado o Plano Nacional Rodoviário, as estradas com interesse no desenvolvimento socioeconómico nacional e mundial foram sendo melhoradas, com a conceção de itinerários e autoestradas, tornando as deslocações mais rápidas e mais seguras (Gomes, 2005) e (Santos, 2010).

Com o crescimento populacional e a necessidade de deslocação das populações, e com a estabilização da conceção de novas vias, a tendência tem

sido de prevenção e manutenção das vias. Os principais pontos estudados neste âmbito têm sido as tecnologias, técnicas e matérias-primas utilizados para a conceção de massas asfálticas para a pavimentação das vias, bem como os consumos energéticos associados e consequentes impactes ambientais (Gomes, 2005).

Segundo o *Vocabulário de estradas e aeródromos (1962)*, citado em (Santos, 2010), um pavimento rodoviário pode ser definido como uma “parte da estrada, rua, ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respetivas solicitações à infraestrutura: terreno, obras de arte, etc. Pode ser constituído por uma ou mais camadas tendo, no caso geral, uma camada de desgaste e camadas de fundação. Cada uma destas pode ser composta e constituída por camadas elementares”.

O pavimento para as estradas é habitualmente composto por 95% de agregados de origem mineral e 5% de betume, onde o betume funciona como uma cola que une os agregados de forma coesa (EAPA and NAPA, 2011).

Os agregados são materiais granulares utilizados na construção e que podem ser de origem natural e/ou mineral que sofreram apenas um tratamento mecânico, artificial, resultante de processamento industrial com modificações térmicas ou outras. O reciclado é outro composto que pode ser incorporado nas misturas asfálticas e que resulta do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizado na construção (EP, 2009). O Betume é um material derivado do petróleo bruto, com propriedades de adesividade, praticamente não volátil, impermeável à água, que em presença de tolueno apresenta solubilidade elevada e que à temperatura ambiente se apresenta no estado sólido (EP, 2009).

Na produção de massas asfálticas para pavimentação de estradas, são utilizadas inúmeras técnicas e tecnologias.

## 1.2 Política Energética em Portugal para a Indústria

Portugal definiu uma Estratégia Nacional para a Energia (ENE2020), determinando diversas metas e medidas e tendo como principal objetivo a redução da dependência energética do País para com o exterior. Os objetivos a que se propôs foram a de aumentar a produção de energia através de recursos internos, garantir o cumprimento de compromissos para com o exterior, reduzir o saldo importador energético em 25%, criar riquezas e consolidar a organização energética no sector das energias renováveis e desenvolver uma organização industrial associada à promoção da eficiência energética (*Resolução do Conselho de Ministros n.º 54/2010 de 4 de Agosto*, 2010).

Através da conceção de planos de promoção de eficiência energética e de redução das emissões de GEE, Portugal estendeu os objetivos da ENE2020 pretendendo reduzir a dependência energética do País face ao exterior em 74% em 2020. A progressão no sentido de independência energética, referente aos combustíveis fósseis, visa garantir os compromissos assumidos no contexto das políticas europeias de combate às alterações climáticas, alterando para consumo por fontes de energia renovável 60% da eletricidade produzida e 31% do consumo de energia final, aliando ainda, uma redução de 20% do consumo de energia final concordante com o Pacote Energia-Clima 20-

---

20-20, bem como uma redução de 25% do saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas. Os objetivos a que se propõe Portugal, visam a criação de riqueza e a consolidação de uma organização energética no sector das energias renováveis, o desenvolvimento de uma organização industrial associado às indústrias na promoção de eficiência energética e a promoção do desenvolvimento sustentável para que Portugal consiga cumprir com os objetivos propostos para com a UE (*Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, 2010*).

No âmbito do ENE2020 foi desenvolvido o PNAEE, abrangendo todos os sectores que utilizam recursos energéticos.

Referente à indústria, pela sua relevância como um dos focos principais no que respeita à possibilidade de redução de consumos energéticos, o PNAEE direcionou os seus objetivos para a minimização destes, através da sua gestão por medidas de eficiência energética. Portugal, para o efeito, concebeu um regulamento denominado de SGCIE (Sistema Gestão de Consumos Intensivos de Energia) (*Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008 de 20 de Maio, 2008*).

O referido regulamento (SGCIE - Decreto-Lei n.º 71/2008) é aplicável a todas as instalações que possuam consumos superiores a 500 tep/ano, excetuando as instalações de cogeração juridicamente autónomas dos respetivos consumidores de energia (*Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril, 2008*).

As instalações que possuam esta característica estão obrigados a realizar o registo das instalações na organização de gestão de consumos intensivos de energia, a realizar auditorias energéticas para avaliar quais os pontos críticos de consumo de energia, que medidas podem ser implementadas e, se possível, integrar fontes energéticas renováveis. Também são responsáveis pela elaboração de planos de racionalização de consumos energéticos (PREn), que por intermédio das auditorias energéticas, surgiram medidas aplicáveis. Após a apresentação à entidade referenciada para o efeito (ADENE), o PREn poderá ser validado e desta forma possibilitar a sua aplicação sob a responsabilidade de um técnico credenciado (*Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril, 2008*).

As auditorias são realizadas de forma a verificar a forma como é utilizada a energia, bem como a conceção e o estado da instalação, incluindo a recolha de elementos necessários à elaboração do PREn. A periodicidade de realização de auditorias é de 6 a 8 anos, mediante o consumo anual verificado. Para consumos compreendidos entre os 500 tep/ano e os 1000 tep/ano a periodicidade é de 8 anos, e acima de 1000 tep/ano é de 6 anos (*Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril, 2008*).

O regulamento, através dos PREn, visa minimizar os consumos energéticos, e para tal utiliza indicadores para que se consiga verificar a aplicabilidade das medidas no funcionamento da indústria quantificando-os e comparando-os com as metas impostas. Os indicadores avaliados são: a intensidade energética, calculado pelo quociente entre o consumo total de energia e o VAB das atividades empresariais, e a intensidade carbónica, calculado pelo quociente entre o valor das emissões de GEE (oriundas dos processos de produção) e o respetivo consumo total de energia (*Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril, 2008*).

### **1.3 Objetivo e Objeto de estudo**

A Prioridade S.A., é uma empresa cujo processo produtivo assenta essencialmente na produção de massas asfálticas a quente em central fixa. O consumo mais elevado é o de gás natural, o qual é utilizado no ponto de secagem e no sobreaquecimento de agregados para posterior produção de misturas dos componentes necessários à realização das massas asfálticas.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar a empresa e a instalação ao nível dos consumos energéticos e económicos associados ao processo produtivo, e nomeadamente, obter um modelo que permita prever o comportamento do cilindro exsicador, face às diferenças de temperaturas, humidades e conteúdo de fresado a incorporar nas misturas. Este modelo deve possibilitar a monitorização, análise e avaliação da possibilidade de criar vários cenários possíveis para obter as misturas de acordo com o menor consumo energético.

### **1.4 Estrutura do Relatório**

O presente relatório está dividido em três partes principais, compostas por alguns capítulos. A primeira parte é referente à introdução ao trabalho a desenvolver e à apresentação da empresa alvo de estudo. A segunda parte é referente à caracterização da instalação a nível económico-energético, evidenciando o principal problema energético associado à produção de massas asfálticas. Por último, a terceira parte é referente à descrição da metodologia, à apresentação dos resultados obtidos e às principais conclusões.



## **CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO DE TÉCNICAS E TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE MASSAS ASFÁLTICAS EM CENTRAL FIXA – “HMA”**

A produção de massas asfálticas a quente (“HMA” - *Hot Mix Asphalt*), é designada desta forma por se realizar em um tambor secador (cilindro exsicador) que tem como função secar e aquecer os agregados para a posterior mistura. Esta pode ser realizada por dois tipos de centrais, as contínuas (“*Drum mix plant*”) e as descontínuas (“*Batch mix plants*”). No primeiro tipo, a mistura e toda a produção realiza-se em um cilindro exsicador, seguindo diretamente para o armazenamento; no segundo tipo, a mistura realiza-se em um cilindro separado, com destino a uma unidade de mistura e, posteriormente, segue para armazenamento, sendo um exemplo típico de centrais utilizadas na Europa (EAPA, 2009).

Os agregados utilizados para a produção de massas asfálticas devem respeitar normas e ensaios normativos, obedecendo a exigências ao nível de granulometria, limpeza, resistência ao desgaste e forma de partículas (Miguel and Baptista, 2006).

Os materiais que constituem as massas asfálticas são determinados mediante as misturas pretendidas. Segundo Hunter, citado em Gillespie (2012), os materiais passíveis de serem utilizados, podem ser classificados em três grupos. O primeiro é composto por rochas ígneas, sedimentares, metamórficas, e areia ou cascalho. O segundo grupo é referente ao reaproveitamento de resíduos de processo de fabrico (como por exemplo, as areias de fundição). E, por último, o terceiro, é constituído por agregados provenientes da reciclagem de asfalto.

Os equipamentos utilizados nas centrais de produção de asfalto podem ser resumidos a: tremonhas de alimentação, unidade de secagem de agregados, filtros de mangas, tanques de armazenamento de betume e de *filer* e, por fim torre de mistura de asfalto. O processo pode ser resumido a aquecer e secar os agregados para posterior mistura com *filer* e betume (EAPA, 2009).

Como referido acima, a produção de asfalto tem vindo a sofrer algumas alterações, na medida em que inclui atualmente uma componente de material reciclado proveniente da fresagem, decorrente de atividades de manutenção de pavimentos. A utilização do reciclado reduz os custos de aquisição de novos materiais, e auxilia na redução do impacte ambiental associado, reintroduzindo os pavimentos degradados. O material denomina-se de fresado, tendo na sua constituição agregados e betume envelhecido (LNEC, 2005). Alguns cuidados têm de ser prestados na introdução do material fresado: terá de se conhecer a sua proveniência, bem como o tipo de agregados existentes, sendo que a determinação da percentagem existente de betume também é um requisito. Posteriormente o fresado é adicionado à mistura para que se obtenha uma massa asfáltica com a qualidade pretendida (LNEC, 2005).

## Centrais de produção de massas asfálticas

### 2.1 Modelo base de produção de massas asfálticas em central fixa (Processo Descontínuo)

O modelo base de produção de asfalto pode ser descrito na Figura 2. Alguns cuidados têm de ser tomados antes de iniciar a produção. Os agregados têm de estar próximos da unidade de produção e devem ser armazenados em local com baixo teor de humidade para que os custos energéticos sejam reduzidos na posterior utilização (EAPA, 2009). No que concerne à produção, os agregados são colocados em diferentes tremonhas, sendo posteriormente depositados, conforme a composição da mistura requerida, numa passadeira rolante com destino ao tambor secador. Os agregados surgem no tambor secador, no lado oposto à chama, passando por uma fase de secagem, seguindo a fase de sobreaquecimento, atingindo temperaturas de 135 °C a 180 °C, até que saiam do tambor secador para um elevador, que o transporta a uma secção da torre de mistura, onde ocorre a separação dos agregados por granulometria e peso, para depois serem adicionados num tanque de mistura com o betume e *filler* (na mesma torre) (EAPA, 2009).

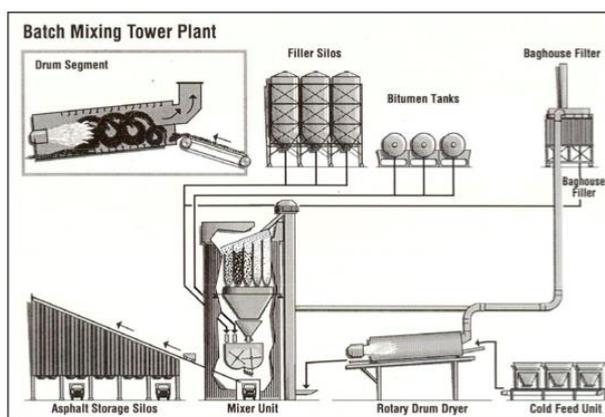


Figura 2 - Configuração de central de produção de asfalto (EAPA, 2009)

#### Modelo de central de produção com recurso a **RAP**

A produção de massas asfálticas com introdução de material reciclado pode ser realizado por diferentes técnicas: a frio, a quente e por *recycle* (INIR, [s.d.]). O tratamento do material fresado em todos os tipos de central tem de ser processado e caracterizado.

#### Método **RAP**

O método de *Recycling Asphalt Pavement* é uma técnica que consiste na utilização do asfalto degradado, envelhecido, que é retirado dos pavimentos que estão a ser recuperados. Ao ser incorporado no processo produtivo,

apresenta como vantagens a conservação dos recursos, as mais-valias económicas e energéticas e a proteção do ambiente (INIR, [s.d.]).

### 2.1.1 Produção de massas asfálticas com inclusão de material a reciclar a frio

O método de produção com recurso a material a reciclar a frio é relativo à adição deste material, à temperatura ambiente, após o cilindro exsicador, ou no tanque de mistura. A técnica de adicionar o material a reciclar a jusante do tambor secador surge como a mais utilizada. Os agregados após a secagem são sobreaquecidos, para aquecer e secar o material a reciclar durante o transporte até ao tanque de mistura (EAPA, 2009) (Figura 3).

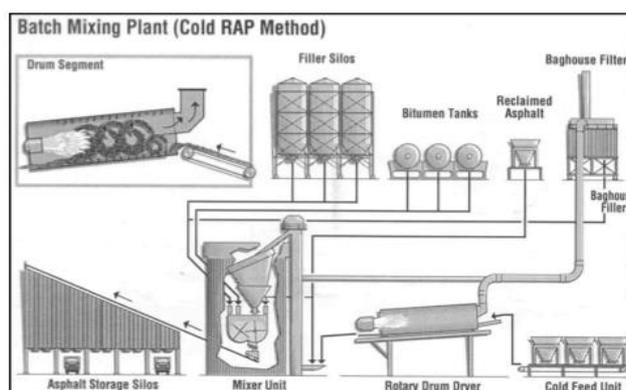


Figura 3 - Método Central de produção com recurso a RAP a frio (EAPA, 2009)

A possibilidade de incorporação de material a reciclar através desta técnica situa-se entre os 10% e 30%, dependendo do teor de humidade, da qualidade do fresado e das especificações das novas misturas a obter (EAPA, 2009).

Algumas desvantagens encontradas são o sobreaquecimento dos agregados, consumindo mais recursos energéticos, para que durante a elevação dos agregados para a torre de mistura, por contacto com o fresado o possam secar e retirar a humidade. A combinação de diferentes temperaturas dos diversos componentes, provoca o fenómeno de choque térmico, que pode influenciar na composição do composto final a obter.

### 2.1.2 Produção de massas asfálticas com inclusão de material a reciclar a quente

No método de produção com recurso a material a reciclar a quente (Figura 4) procede-se da mesma forma que no processo a frio, excetuando o aquecimento do material a reciclar, que é efetuado num tambor secador individual, ligado em paralelo, sendo posteriormente adicionado (EAPA, 2009). Uma das vantagens deste processo ocorre com a poupança de combustível associado ao sobreaquecimento dos agregados, bem como com a extensão da capacidade de incorporação de material a reciclar, diminuindo o choque térmico que ocorre no método a frio.

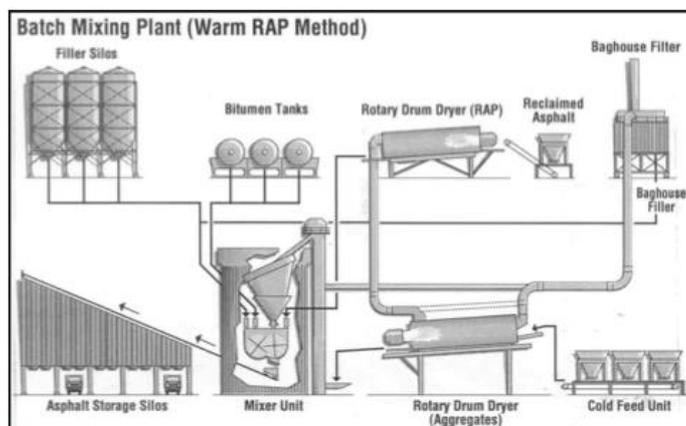


Figura 4 - Método *RAP* a quente (EAPA, 2009)

A possibilidade de incorporação de material a reciclar através deste processo produtivo é compreendido entre os 30% a 70%. A definição é efetuada mediante a determinação das propriedades especificadas pela mistura a reciclar (INIR, [s.d.]).

### 2.1.3 Produção de massas asfálticas por *Recyclean*

No presente método, como indicado na Figura 5, os agregados e o fresado são adicionados no mesmo cilindro. Os agregados são inseridos no lado oposto à chama. O material a reciclar é adicionado a jusante da chama, para que não entre em contato direto com a mesma e não seja sobreaquecido.

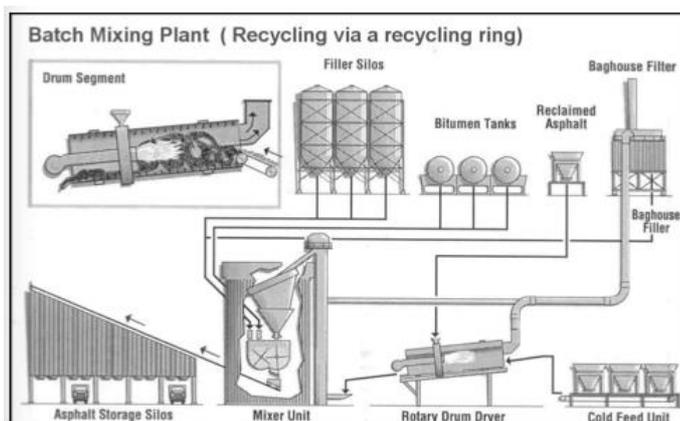


Figura 5 - Método "*Recycling via a recycling ring*" (EAPA, 2009)

A incorporação de fresado por este processo produtivo é de 35% a 50% (EAPA, 2009).

### 2.1.4 Produção de massas asfálticas em central (torre)

Este método de produção assenta no princípio de armazenamento intermédio dos agregados aquecidos, como exemplificado na Figura 6. O processo de

secagem pode ser realizado independentemente do processo de mistura: após os agregados serem aquecidos e secos, são transportados para silos aquecidos de armazenamento, localizados acima do tanque de mistura, distribuídos por diferentes granulometrias (INIR, [s.d.]).

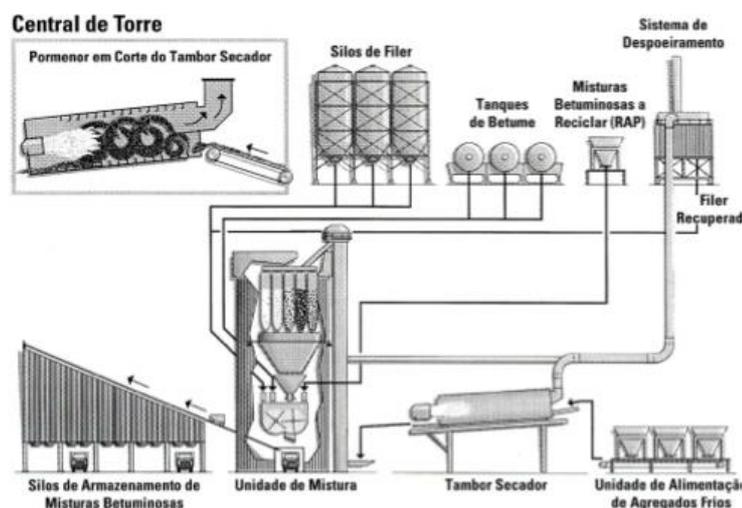


Figura 6 - Método de produção de massas asfálticas por *central de torre* (INIR, [s.d.])

Este método produtivo tem vantagens na ordem de seleção de misturas necessárias no momento, pois ao serem armazenados os diferentes tipos de agregados, as misturas podem ser compostas e alteradas rapidamente sem ter de aguardar pela secagem dos agregados e seu processamento normal de mistura (INIR, [s.d.]).

## 2.2 Modelo de produção de central fixa de massas asfálticas (Processo Contínuo)

A produção de massas asfálticas por processo contínuo segue o mesmo procedimento de produção que o descontínuo: a secagem, aquecimento e mistura ocorrem no tambor secador misturador (exemplificado na Figura 7). A introdução de material a reciclar pode sofrer a secagem e aquecimento do material a reciclar por três métodos: por **chama direta**, **chama indireta** e por **contato com os agregados sobreaquecidos** (INIR, [s.d.]). Evidencia-se o facto de o material a reciclar ser inserido sempre a frio, pois no tambor secador é que se vai proceder ao seu aquecimento ou então ser inserido posteriormente. A produção em contínuo tem o seu foco no tambor secador misturador, pois é a partir deste que o produto final segue para armazenamento ou para os veículos de transporte.

### 2.2.1 Produção de massas asfálticas por alimentação separada

Atualmente a produção de massas asfálticas une dois métodos: o de chama direta e por contato com os agregados sobreaquecidos, denominada de *alimentação separada* (Figura 7).

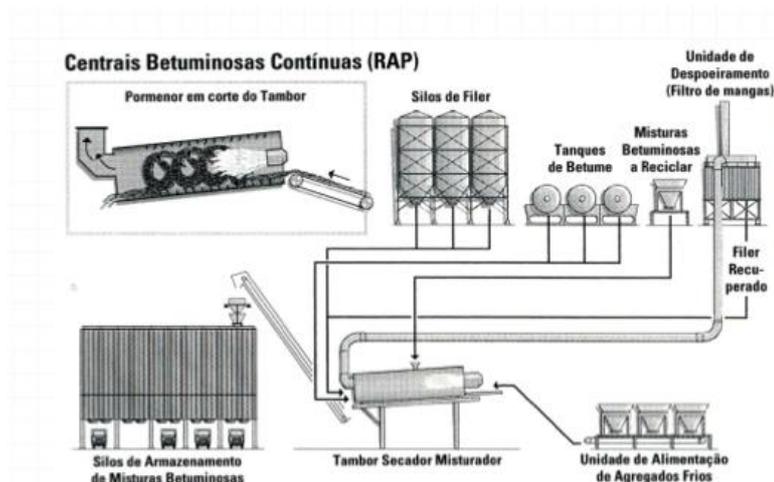


Figura 7 - Modelo de central de produção de massas asfálticas por alimentação separada (INIR, [s.d.])

O material a reciclar, após sofrer o processamento devido, é introduzido no centro do tambor secador misturador, para que seja aquecido pelos gases de combustão e também pelo contacto com os agregados sobreaquecidos, que são introduzidos na extremidade do tambor (Figura 8) (INIR, [s.d.]).

### 2.2.2 Produção de massas asfálticas de duplo invólucro

Este método de produção é denominado de *tambor secador misturador de duplo invólucro*, (Figura 8) que consiste num tambor de fluxo contracorrente envolvido por um tambor exterior fixo. Os agregados são inseridos na extremidade oposta da chama, no tambor interior, onde são secos e sobreaquecidos (INIR, [s.d.]).

Posteriormente, ao longo do tambor e pelo seu movimento, os agregados vão caindo por aberturas existentes do tambor interior para o tambor exterior, sendo, então, o material a reciclar introduzido no tambor exterior, bem como o *fíler* e o betume. A mistura vai ocorrer no espaço entre o tambor exterior e o tambor interior antes de serem transportada para os silos de armazenamento (INIR, [s.d.]).

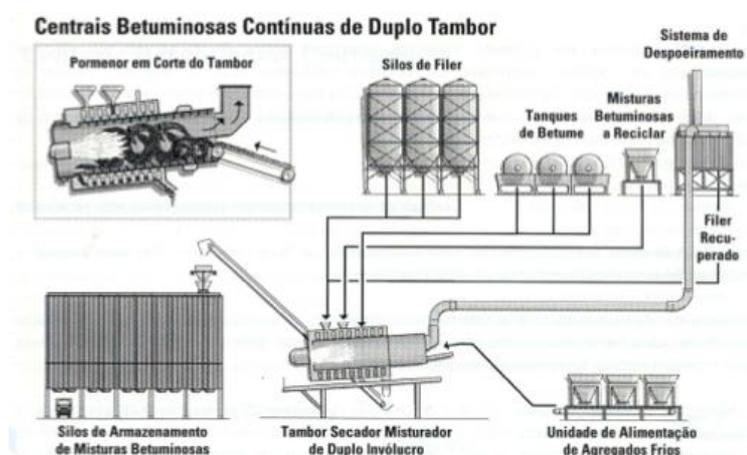


Figura 8 – Modelo de produção de massas asfálticas pelo método de duplo tambor (INIR, [s.d.])

### 2.2.3 Produção de massas asfálticas de fluxos contracorrente

O método de produção descrito na Figura 9 é denominado de fluxos em contracorrente (INIR, [s.d.]). Tal como acontece na produção em central fixa descontínua, o fluxo de agregados é contrário ao sentido do fluxo de gases de combustão. O princípio explicitado permite reduzir a temperatura dos gases aquecidos, não sendo necessário um aquecimento tão elevado nas misturas a reciclar, melhorando o desempenho energético e ambiental da instalação (INIR, [s.d.]).

Este tipo de processo de produção, em condições óptimas, tem a capacidade de incorporar material a reciclar na ordem dos 50% (INIR, [s.d.]).

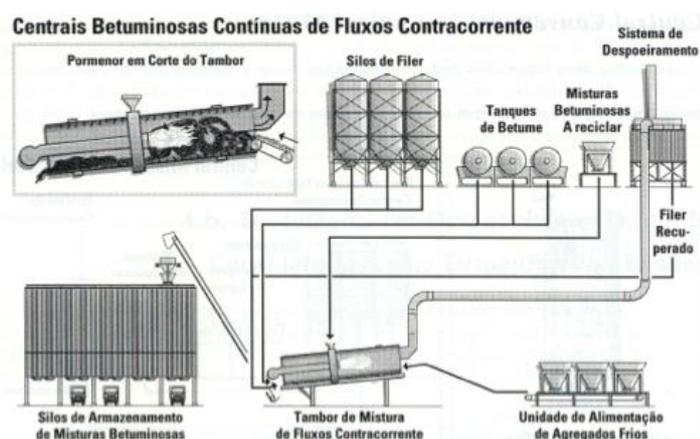


Figura 9 - Modelo de produção de massas asfálticas de fluxos contracorrentes (INIR, [s.d.]).

## 2.3 Descrição de técnicas e tecnologias para produção de massas asfálticas em central fixa – “WMA”

A técnica visa *WMA* manter a eficiência do processo produtivo, baixando os custos energéticos associados ao processo produtivo.

A denominação de “*WMA*” (*Warm Mix Asphalt*) é atribuída às novas tecnologias associadas à produção de misturas betuminosas, requerendo estas menor consumo energético. Existem inúmeros benefícios associados às tecnologias de *WMA* podendo estender-se em três áreas: ambiente, produção e aplicação, e económica (Capitão, Picado-Santos e Martinho, 2012).

A base de *WMA* assenta na produção de misturas asfálticas a temperaturas mais reduzidas, e com isso, origina alguns benefícios ambientais, demonstrados em alguns países europeus e nos EUA, tais como a redução dos GEE.

Com a redução da temperatura de produção, a redução de energia pode ir até 35% ou mais, dependendo do tipo de tecnologia aplicada à instalação. As misturas produzidas através de *WMA* não necessitam de um tempo de cura até à abertura ao tráfego após completar a pavimentação, como também não necessitam de uma camada de vedante como as misturas betuminosas a frio (Button, Estakhri e Wimsatt, 2007; John D’Angelo *et al.*, 2008).

---

A utilização de técnicas e tecnologias *WMA* pode ser realizada através de equipamentos adicionais à instalação de produção ou pela adição de compostos (Capitão, Picado-Santos e Martinho, 2012).

Existem inúmeros projetos de utilização de tecnologias de *WMA* para produção de misturas asfálticas, mas alguns desafios têm de ser ultrapassados. Existem algumas dúvidas no que diz respeito ao custo total de todo o ciclo de vida do produto advindo da produção através de *WMA*, bem como à tecnologia disponível para a produção, que geralmente aumenta o custo de produção inicial (Capitão, Picado-Santos e Martinho, 2012).

Outra desvantagem, são os custos adicionais de aquisição dos suplementos, que apenas podem ser compensados pelo abaixamento da temperatura (Button, Estakhri e Wimsatt, 2007; John D'Angelo *et al.*, 2008).

Segundo a EAPA (EAPA, 2010), existem três métodos de produção de misturas asfálticas de *WMA*: nomeadamente **aditivos orgânicos** a adicionar à mistura ou ao betume, **aditivos químicos** e **técnica de formação de espuma**.

Os diferentes **aditivos orgânicos** podem ser utilizados para reduzir a viscosidade do betume a temperaturas abaixo dos 90°C. A seleção do tipo de aditivo deve ser feita cuidadosamente para que o ponto de fusão seja superior à temperatura a ser utilizada, e para minimizar a fragilidade do asfalto a temperaturas mais baixas. Os aditivos de maior utilização são ceras ou amidas gordas, bem como uma cera especial produzida através da conversão do gás natural. Estes aditivos orgânicos podem reduzir a temperatura da mistura entre 20 °C a 30 °C, aumentando a resistência à deformação do asfalto modificado (EAPA, 2010).

Os **aditivos químicos** não alteram a viscosidade do betume, pois os surfactantes operam ao nível da interface microscópica dos agregados e dos betumes, regulam e reduzem as forças de fricção na interface a um limite de temperaturas, situadas entre os 85°C e os 140 °C. É possível misturar o betume e os agregados, e compactar a mistura a temperaturas mais baixas. Os aditivos químicos podem reduzir a temperatura de mistura e a compactação entre 20 °C e 30°C (EAPA, 2010).

Diversas **técnicas de formação de espuma** (Figura 10) são utilizadas de forma a reduzir a viscosidade do betume. Existem várias técnicas de aplicar pequenas quantidades de água no betume quente, sendo aquela vaporizada, aumentando o volume do betume e reduzindo a viscosidade por um determinado período de tempo, antes do material arrefecer. Seguidamente a espuma quebra e o betume retorna à forma inicial (EAPA, 2010).

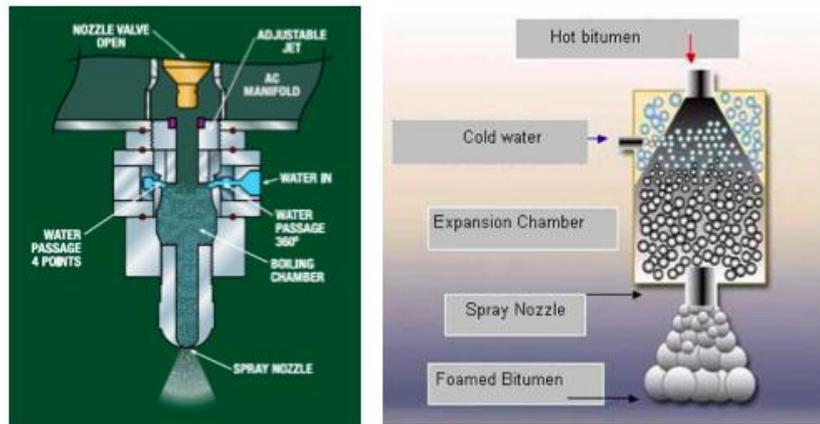


Figura 10 - Exemplo de aplicação de técnica de formação de espuma (EAPA, 2010)



---

## CAPÍTULO III - EMPRESA EM ESTUDO

### 3.1 Identificação da empresa

A Empresa em estudo é a **Prioridade – Vias de comunicação, S.A.**, que foi constituída há quinze anos, direcionando-se inicialmente para o fabrico de massas betuminosas. A Prioridade dispõe de uma central de fabrico de massas betuminosas, uma equipa de pavimentação e alguns meios de transporte próprios (*Prioridade*, [s.d.]). Atualmente dispõe de duas centrais de fabrico de massas betuminosas em descontínuo (SIM-CB 140P e AMMANN 1500) com capacidade de produção de 180 ton/h (em conjunto) e de duas brigadas de aplicação destes produtos, autonomia de meios de transporte.

A Prioridade S.A., tem como principais atividades a construção e reabilitação de vias de comunicação e a requalificação e construção de infra estruturas urbanas. Nomeadamente de redes de abastecimento de águas, esgotos, gestão/construção de redes elétricas, de gás, telefones e pavimentos pedonais (*Prioridade*, [s.d.]). A empresa encontra-se sediada na Zona Industrial de Viadores – Mealhada, com um capital social de 1.500.000 € e um volume de negócios que ronda os 10.000.000 € ano<sup>-1</sup> (*Prioridade*, [s.d.]). A sua produção nos últimos cinco anos ultrapassou as 610 000 toneladas de massas asfálticas (*Prioridade*, [s.d.]). As massas asfálticas produzidas pela Prioridade são betão betuminoso, mistura betuminosa densa, macadames betuminosos e argamassas betuminosas.

A ação desenvolve-se junto da Administração Pública, Central e Regional, tendo como zona de atuação o Litoral Centro numa incidência que abrange os Concelhos desde o sul de Coimbra até ao norte de Aveiro, operando, para o interior, até um raio cerca de 70 km (*Prioridade*, [s.d.]). A empresa encontra-se certificada no âmbito da qualidade NP EN ISO 9001:2000, Certificado Número PT \_ 2007/CEP.2871 (*Prioridade*, [s.d.]).

A missão da Prioridade é produzir e aplicar massas betuminosas que satisfaçam as necessidades e expectativas dos clientes e a sua visão é ser considerada um parceiro a ter em conta em todas as obras de construção de estradas (*Prioridade*, [s.d.]).

A Prioridade S.A., dispõe de serviços de engenharia que desenvolvem a sua atividade nos estudos de projetos, orçamentos, consultoria e pareceres técnicos, deslocação às obras, identificação de riscos, e elaboração de relatórios na área de Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho.

### 3.2 Caracterização energética

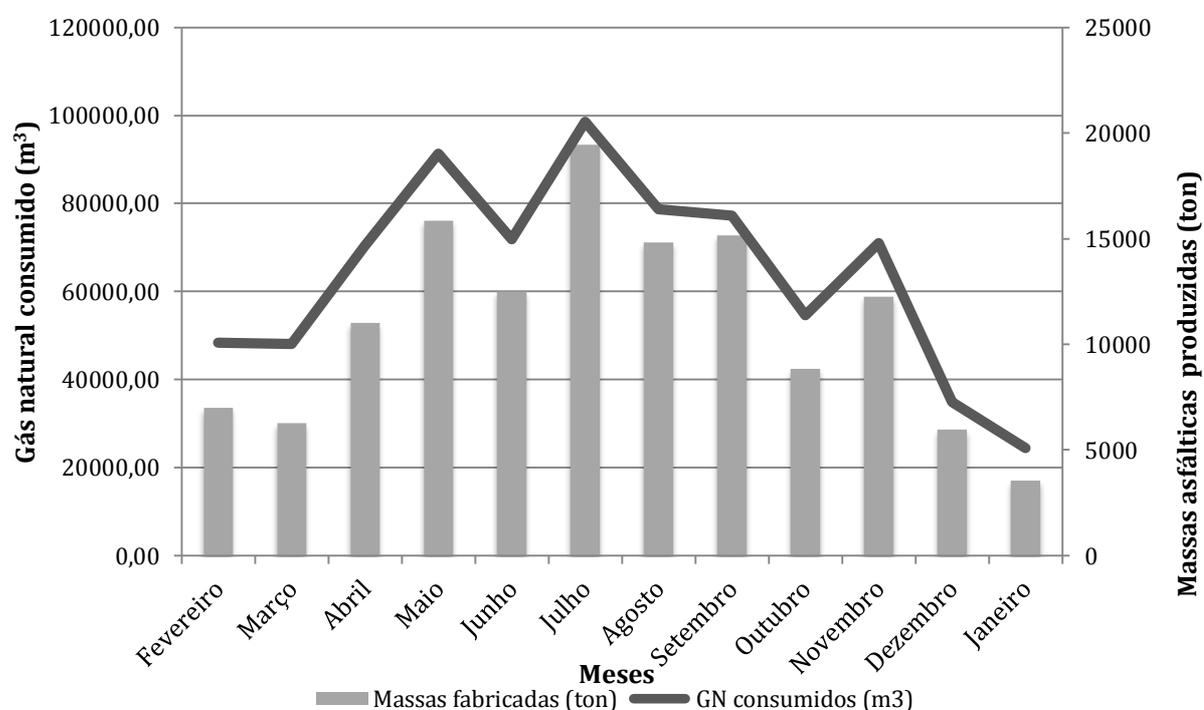
A Prioridade S.A., não se encontra inserida no sistema de gestão de consumos intensivos de energia (Decreto Lei n.º 71/2008) e, conseqüentemente, não possui PReN. Contudo, de forma inerente ao seu processo produtivo e à sua responsabilidade social, tem vindo a tomar algumas medidas de redução de consumo energético, como por exemplo, o recurso a material reciclado para

incorporar nas massas asfálticas. Da análise das faturas do ano de 2013 verificou-se, pela distribuição dos seus consumos, que o maior peso da fatura recai sobre o gasóleo (53%), seguindo-se o gás natural (41%) e por último a energia eléctrica (6%).

Através dos consumos energéticos associados e convertendo-os para unidade de comparação (tep), por intermédio do Despacho n.º 17313/2008, verificou-se que o consumo que possui uma maior representação é o gás natural (60%), seguindo-se o gasóleo (34%) e, por último, a energia eléctrica (6%).

Associando o custo económico ao consumo em tep evidenciou-se que o consumo mais importante é o de gás natural.

A produção referente ao ano 2013 (Figura 11) rondou as **132687** toneladas de massas asfálticas e para a realização deste processo foram consumidos **769482,21** Nm<sup>3</sup> de gás natural.



**Figura 11 – Consumo de gás natural associado à produção massas asfálticas em 2013**

A Prioridade consumiu **1186,25 tep/ano** para produzir e aplicar 132687 toneladas de massas asfálticas, encontrando-se desta forma abrangida pelo Decreto-Lei n.º 71/2008 e sendo classificada como consumidora intensiva de energia. A distribuição de consumos e custos associados à empresa está representada na Tabela 1 (determinada na secção 4.1).

**Tabela 1 - Distribuição de consumos e custos energéticos**

Tipo de energia	Consumos			Custos (€)
	Quantidades	Unidades	(tep)	
Energia Elétrica	345,07	MWh	74,19	64 512,77
Gás Natural	660,12	ton	710,95	452 370,39
Gasóleo	392,5	ton	401,12	593 269,10

Os indicadores energéticos da Prioridade podem ser verificados na Tabela 2 (determinada na secção 4.1).

**Tabela 2 - Indicadores Energéticos**

Produto	Quantidade (ton)	IE (kgep € <sup>-1</sup> )	CEE (kgep ton <sup>-1</sup> )	IC (tonCO <sub>2</sub> tep <sup>-1</sup> )
Massas Asfálticas	132687,00	0,37	5,92	1551,39

O gás natural é utilizado em dois pontos de consumo, descritos na secção 3.3. A distribuição dos dois pontos de consumo é de sensivelmente 90% para o cilindro exsicador e 10% para a caldeira de aquecimento de óleo térmico para manutenção da temperatura do betume (Tabela 26 da secção 5.2).

Os custos associados ao de consumo de gás natural em 2013 representam para o cilindro exsicador **407 133,35 €** e para a caldeira **45 237,04 €**.

### 3.3 Descrição do processo produtivo da instalação

O processo produtivo, da Prioridade S.A., assenta na produção de massas asfálticas com inclusão de material reciclado a frio e encontra-se descrito na Figura 12.

### 3.3.1 Diagrama de operação da Instalação em Análise

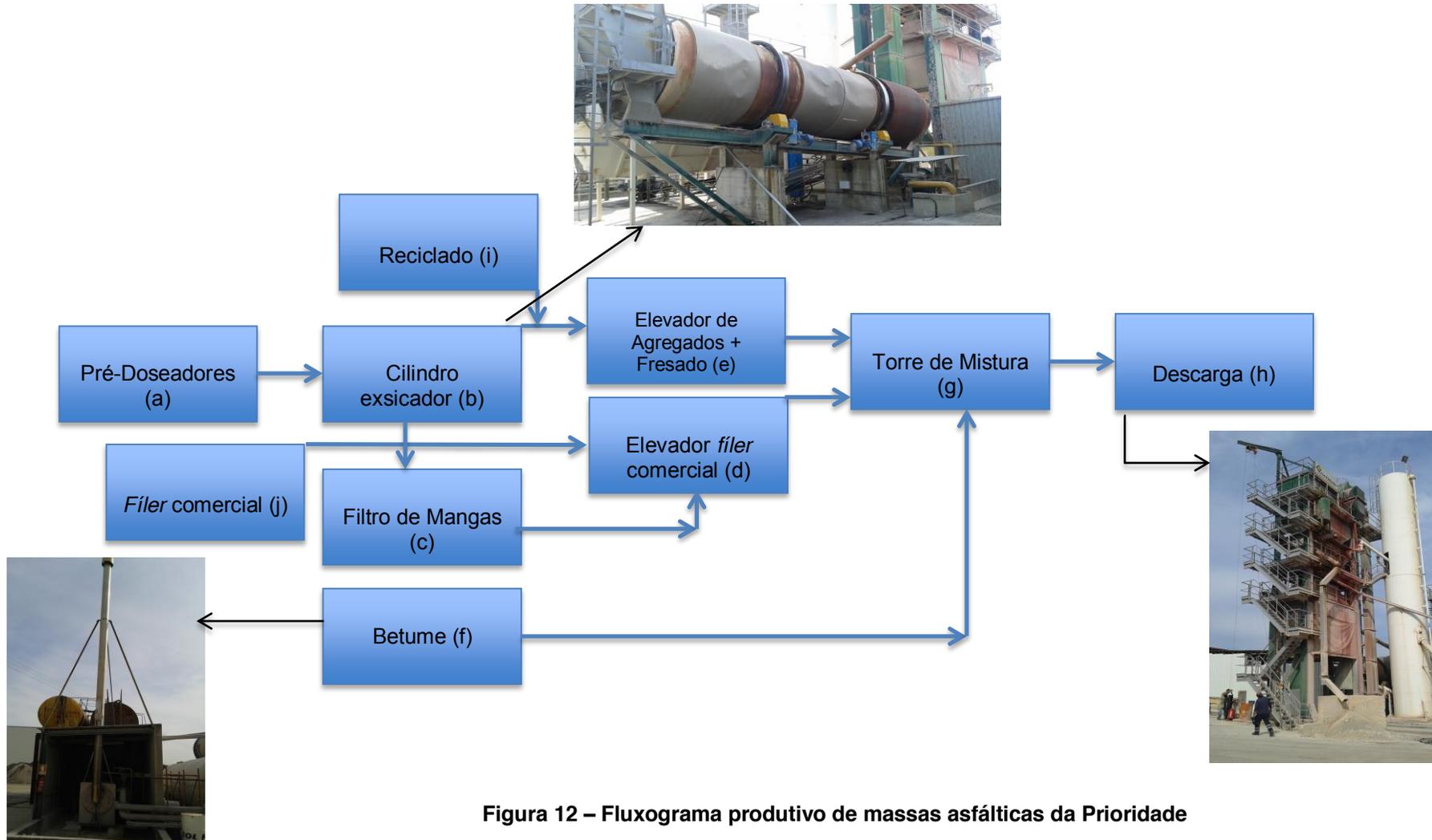


Figura 12 – Fluxograma produtivo de massas asfálticas da Prioridade

---

## Descrição do Processo produtivo de massas asfálticas

### a) Pré-Doseadores

Os agregados provenientes dos fornecedores são colocados nos pré-doseadores. Os pré-doseadores são formados por 5 tremonhas de admissão de diferentes agregados em linha, com capacidade para 14 m<sup>3</sup> cada, possuindo uma passadeira rolante sob as tremonhas, em borracha, com capacidade de 150 ton/h.

As tremonhas são fabricadas em aço, e possuem a forma de pirâmide descendente, seccionada com local de dosagem.

O processo realizado pelos pré-doseadores é o de dosear as misturas a entrar no cilindro exsicador a jusante, sendo controlado por um computador.

O abastecimento dos agregados ainda é composto por outra passadeira rolante, sob a passadeira acima descrita, com capacidade para 200 ton/h, velocidade máxima de 94 m/min, que direciona os agregados para outra passadeira posterior.

Este grupo é composto por 6 motores com variador, 5 motores de 1,5 kW e um motor de 4 kW.

### b) Cilindro exsicador

O Cilindro exsicador tem como função secar e sobreaquecer os agregados para assegurar a qualidade da mistura requerida e auxiliar a secagem do material a reciclar.

A admissão dos agregados no processo é efetuado por uma passadeira rolante de borracha, que recebe os agregados dos pré-doseadores e os envia que os envia para o interior do cilindro. O movimento da passadeira é realizado por um motor de 4kW com velocidade máxima de 100 m/min.

O cilindro exsicador tem 9 metros de comprimento e 2 metros de diâmetro, com inclinação de 5°.

O cilindro possui as extremidades fixas, com admissão de agregados numa extremidade e na outra a sua descarga, secos e sobreaquecidos.

Na zona de admissão de agregados existem três aberturas, correspondentes à admissão de agregados, emissão de partículas e gases de combustão, e ao acesso ao interior (manutenção). Na extremidade oposta existem duas aberturas, uma para o queimador, e outra para a subsequente descarga dos agregados. O cilindro é constituído por aço resistente ao calor e abrasão, e reforçado nos pontos mais cruciais em termos térmicos e mecânicos. No seu interior possui palas colocadas para que os agregados sejam movidos para realizar a troca térmica de forma homogênea com os gases de combustão emitidos pelo queimador, retirando a sua humidade e sofrendo sobreaquecimento.

A rotação do cilindro é assegurada por 4 motores de velocidade variável de 22,5 kW cada.

O queimador é um SIM BSB 7 GR de 11180 kW (1291 Nm<sup>3</sup>/h), e o ar comburente é fornecido por um ventilador, FQ 631 de 50 mbar de pressão, posicionado a 90° em relação ao queimador com potência de 37 kW.

---

Neste processo, ocorre a emissão de partículas e gases de combustão que são extraídos por um ventilador (ART 1251) de 92 kW, através de um filtro de mangas.

c) Filtro de Mangas

O filtro de mangas é um DM-IF 378 que tem como função reter as partículas oriundas do cilindro exsicador (*fíler*), as quais são enviadas para o elevador de *fíler*. As partículas retidas são posteriormente inseridas no processo através de motores sem-fins. A instalação possui 5 pontos de recolha de *fíler*, nos quais são utilizados motores sem-fins, um de 4 kW, dois de 3 kW e dois de 1,5 kW.

d) Elevador de *fíler* e j) *fíler* comercial

O elevador de *fíler*, (motor de 3 kW), recebe o *fíler* proveniente do filtro de mangas e *fíler* comercial, para que a quantidade de *fíler* necessária à produção esteja sempre disponível, e transporta-o para a torre de mistura.

e) Elevador agregado + fresado e i) Reciclado

Após a saída dos agregados secos e sobreaquecidos, é adicionado o material fresado, depois de processado. A elevação para a torre de mistura é realizada por intermédio de um elevador com potência de 15 kW, e a deslocação do fresado é realizada através de três passadeiras, cada uma com um motor de 1,5 kW, para promover a sua deslocação.

f) Betume

O betume é mantido a temperatura constante de 170 °C, em cisternas de 50 m<sup>3</sup>. Para isso é utilizada uma caldeira a gás natural de potência de 349 kW, onde é aquecido óleo. A caldeira tem um caudal mínimo de débito de 19 m<sup>3</sup>/h e máximo de 43 m<sup>3</sup>/h de gás natural, com potência térmica mínima de 185 kW e máxima de 425 kW, tendo acoplado um motor de 0,37 kW. O betume é enviado para a torre de mistura por meio de uma bomba de 11 kW.

g) Torre de mistura

A distribuição de material é processado por três formas: o *fíler* é acondicionado em silos contidos no interior da torre de mistura, o betume é recebido na torre de mistura por via de bombas e é pesado para determinar a quantidade necessária à mistura e, por último, os agregados e fresado são acondicionados por granulometria em vários compartimentos através de balanças e crivos que determinam o silo adequado.

h) Descarga

Na torre de mistura a produção é finalizada num tanque de mistura com capacidade total de 28 m<sup>3</sup>, que primariamente recebe os agregados, seguindo-se o betume, através de um aspersor, e finalmente o *fíler*. A mistura é efetuada por intermédio de um motor de 55 kW, que revolve todos os componentes. Posteriormente a descarga é realizada num veículo apropriado para realizar o transporte.

### 3.3.2 Características técnicas da instalação

A instalação tem uma capacidade máxima de produção de **160 ton h<sup>-1</sup>** de asfalto para as condições a seguir apresentadas:

**Tabela 3 - Especificidades técnicas da central (adaptado do manual do operador da central, pelo Autor)**

Especificidades	
Conteúdo de humidade nos agregados	≤ 3% em peso
Temperatura de agregados à saída do cilindro	140°C ± 5%
Peso específico de material	1,65 ton m <sup>-3</sup>
Calor específico dos agregados	0,21 kcal kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Humidade Residual	≤ 0,5%
PCI (Combustível)	≥ 9800 kcal Nm <sup>-3</sup>
Dimensão máxima de agregados	40 mm
Material peneirado com dimensões 3 mm	≤ 40%
Material peneirado ASMT 200 = 24 microns	≤ 7%
Betume	Binder standard
Produção Horária	<b>160 ton h<sup>-1</sup></b>
Capacidade do misturador	<b>2000 kg</b>
Tempo de mistura	<b>42 s</b>



## CAPÍTULO IV - ABORDAGEM TEÓRICA E METODOLÓGICA

Grabowski e Janowski (2008, 2013) referem que a principal causa do consumo energético destas instalações é o conteúdo em humidade que os materiais possam apresentar e que a sua redução em 1% pode reduzir até 15% do consumo total da instalação.

Deste modo, e de forma a caracterizar energeticamente a instalação, foram realizados alguns estudos relativos ao processo produtivo.

### 4.1 Caracterização Energética da Instalação;

A presente secção pretende caracterizar a empresa segundo o Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de Abril.

Para ir ao encontro do objetivo da presente secção, iniciou-se o estudo pela análise às faturas do ano de 2013, ao nível do gasóleo, energia elétrica e gás natural.

O valor das faturas de gasóleo foram primeiramente convertidos para unidades comparativas (tep) e distribuídos segundo a Tabela 4. As faturas referentes ao gasóleo apresentam o volume (L) e o preço (€); os restantes valores foram calculados tendo por base os valores de conversão presentes no Despacho 17313/2008.

**Tabela 4 - Determinação de consumos energéticos (gasóleo)**

Mês	Volume	Preço	Consumo		Emissão
	(L)	(€)	(ton)	(tep)	(kg CO <sub>2</sub> )

A determinação do consumo em toneladas na Tabela 4 foi realizado através da equação (1), onde o valor 0,853 corresponde à densidade do gasóleo (Despacho n.º 17313/2008).

$$\text{consumo (ton)} = \frac{\text{Volume (L)} \times 0,853 \text{ kg L}^{-1}}{1000 \text{ kg ton}^{-1}} \quad (1)$$

Para a determinação da conversão de consumo em tep e emissão em kgCO<sub>2</sub> foram utilizadas as equações (2) e (3), em que o PCI utilizado foi de 1,022 tep/ton e o fator de emissão de kgCO<sub>2</sub>/tep de 3098,2 (Despacho n.º 17313/2008).

$$\text{Consumo (tep)} = \text{PCI (tep ton}^{-1}) \times \text{consumo (ton)} \quad (2)$$

$$\text{Emissão (kgCO}_2) = \text{Fator de emissão (kgCO}_2 \text{ tep}^{-1}) \times \text{consumo (tep)} \quad (3)$$

Os dados obtidos relativamente à energia elétrica foram obtidos através da compilação das faturas do ano de 2013 e convertidos de acordo com a Tabela 5. O consumo em tep e a emissão de kgCO<sub>2</sub> foram determinados segundo a equação (4) e (5), respetivamente.

Os valores de 0,000215 tep/kWh e 0,47 kgCO<sub>2</sub>/kWh foram retirados do Despacho n.º 17313/2008.

**Tabela 5 - Descrição da conversão da energia elétrica**

Energia	Consumo	Emissão
(kWh)	(tep)	(KgCO <sub>2</sub> )

$$\text{Consumo (tep)} = 0,000215 \text{ (tep kW h}^{-1}\text{)} \times \text{Energia (kW h)} \quad (4)$$

$$\text{Emissão (kgCO}_2\text{)} = 0,47 \text{ (kgCO}_2 \text{ kW h}^{-1}\text{)} \times \text{Energia (kW h)} \quad (5)$$

Por fim a determinação dos consumos referentes ao gás natural foram obtidos como nos pontos acima indicados, ou seja, iniciou-se a compilação das faturas, e seguidamente, os consumos foram discriminados pelos respetivos meses (Tabela 6).

**Tabela 6- distribuição dos consumos de gás natural**

Mês	Energia (kWh)	Energia (MJ)	Consumo (tep)	Custo (€)	Emissão (kg CO <sub>2</sub> )
-----	---------------	--------------	---------------	-----------	-------------------------------

De acordo com a Tabela 6, foi determinado o consumos em MJ e em tep segundo as equações (6), (7). A emissão em kgCO<sub>2</sub> foi obtido segundo a equação (8). Os valores de 1,077 tep/ton e 2683,7 kgCO<sub>2</sub>/tep foram retirados do Despacho n.º 17313/2008.

$$\text{Energia (MJ)} = \frac{\text{Energia (kWh)}}{\text{PCS}_{\text{GN}}(\text{kWh m}^{-3})} \times \rho_{\text{GN}}(\text{kg m}^{-3}) \times \text{PCI}_{\text{GN}}(\text{MJ kg}^{-1}) \quad (6)$$

$$\text{Consumo (tep)} = 1,077 \text{ (tep ton}^{-1}\text{)} \times \text{consumo (ton)} \quad (7)$$

$$\text{Emissão (kgCO}_2\text{)} = 2683,7 \text{ (kg CO}_2 \text{ tep}^{-1}\text{)} \times \text{consumo (tep)} \quad (8)$$

Após as conversões realizadas, os dados comparáveis foram essencialmente os custos (€), os valores em tep e kgCO<sub>2</sub>. Os valores obtidos foram apresentados sob a forma de tabela (Tabela 1).

De forma a ir de encontro ao Decreto-lei 71/2008, foram determinados os indicadores energéticos (Tabela 2). Obtidas a partir das Equações (9), (10) e (11).

$$\text{IE} = \frac{\text{Consumo total de energia (tep)}}{\text{Valor Acrescentado Bruto (€)}} \quad (9)$$

$$CEE = \frac{\text{Consumo total de energia (tep)}}{\text{Produção (ton)}} \quad (10)$$

$$IC = \frac{\text{Emissões Gases Efeito de Estufa (kgCO}_2\text{)}}{\text{Consumo total de energia (tep)}} \quad (11)$$

#### 4.2 Distribuição dos consumos de gás natural

A Prioridade possui apenas um contador de gás para os dois pontos de consumo: o cilindro exsicador e a caldeira de aquecimento de óleo térmico. Para diferenciar os consumos foi realizado um estudo para compreender qual o valor total de gás natural correspondente a cada ponto de consumo.

Os dados foram obtidos através da visualização do contador da Galp, que se encontra na instalação da Prioridade S.A., retirando o valor antes e depois de cada processo de secagem e sobreaquecimento (Tabela 7).

**Tabela 7 - Determinação de funcionamento do cilindro exsicador**

Tempo de Funcionamento do cilindro exsicador	Consumo Total
(hora)	(m <sup>3</sup> )

A determinação do consumo da caldeira de aquecimento de óleo térmico foi obtido através do preenchimento da Tabela 8.

**Tabela 8 - Determinação de funcionamento da caldeira de aquecimento de óleo térmico**

Caldeira	Tempo	N.º Ciclos	Tempo de Funcionamento da caldeira	Consumo
N.º Medição	(min)	ciclo	(h/dia)	(kWh) (m <sup>3</sup> )

Algumas considerações foram tomadas na determinação dos consumos da caldeira:

- A caldeira funciona em modo start e stop;
- Está ligada durante 8 h/dia;
- O gás natural é transformado na totalidade em potência calorífica;
- A caldeira opera à potência máxima.

Para determinar os consumos da caldeira, extrapolou-se o *Tempo de funcionamento* total efetivo (Equação (12)) ao longo das 8 horas. A extrapolação foi realizada tendo em conta o número de ciclos (liga/desliga) que a caldeira realiza durante 10 minutos. O registo do número de ciclos foi efetuado ao longo do dia, para averiguar a necessidade de aquecimento mediante diferentes temperaturas do ar ambiente.

$$\text{Tempo de funcionamento (h)} = \frac{(8 \text{ h} \times 60 \text{ s}) - \left( \frac{\text{min}}{\text{ciclo}} \right)}{60 \text{ s}} \quad (12)$$

O valor energético, em kWh, foi calculado através da relação da potência da caldeira (349kW) (equação (13));

$$\text{Consumo (kWh)} = \text{Tempo de funcionamento (h)} \times 349 \text{ kW} \quad (13)$$

O consumo de gás natural, em m<sup>3</sup>, foi obtido através da Equação (14), para posterior comparação com o consumo do cilindro (PCS = 11,85 kWh/m<sup>3</sup> (GALP, 2010)).

$$\text{Consumo (m}^3\text{)} = \frac{\text{Consumo(kW h)}}{\text{PCS (kW h m}^{-3}\text{)}} \quad (14)$$

Após a realização dos cálculos apresentados, foram determinados valores médios de consumo de gás natural (m<sup>3</sup>) e tempo de funcionamento por dia, referentes aos dois pontos de consumo, com o objetivo de obter a distribuição do consumo de gás natural.

#### **4.3 Estudo de funcionamento do cilindro exsicador (processo descontínuo);**

O estudo teve como principal objetivo avaliar o consumo energético de gás natural em função da produção de massas asfálticas, das horas de funcionamento e dos arranques realizados pelo queimador do cilindro exsicador.

Para a realização do estudo em questão foram realizados os seguintes passos:

- Efetuou-se um levantamento de valores armazenados na memória do computador da central de comando do processo produtivo. O levantamento foi efetuado tendo por base a associação de valores referentes às faturas energéticas e dados de processo do período de fevereiro de 2013 a janeiro de 2014. A capacidade de armazenamento do computador é de 365 dias. O registo teve início em maio de 2013, pois a capacidade de armazenamento foi superada e não permitiu retirar valores anteriores.
- Posteriormente, os valores foram transpostos para o MS Excel de forma a conseguir comparar os valores obtidos entre os meses correspondentes, tendo em atenção não só o consumo de gás natural, mas também a produção de massas asfálticas.

- Foi também calculado o consumo específico mensal associado ao consumo de gás natural e produção de massas asfálticas durante o ano transato (Equação (15));

$$\text{Consumo específico (m}^3 \text{ ton}^{-1}) = \frac{\text{Consumo de gás natural do cilindro exsicador (m}^3\text{)}}{\text{Produção de massas asfálticas (ton)}} \quad (15)$$

#### 4.4 Balanço mássico e energético ao cilindro exsicador

A realização do balanço mássico e energético teve por base o manual de Matos (2011) e o trabalho de Land (2012).

A realização dos balanços é efetuada em estado estacionário, traduzindo o princípio de conservação de energia e massa (Figura 13) e tendo em atenção a existência de perdas e ineficiências de processo.

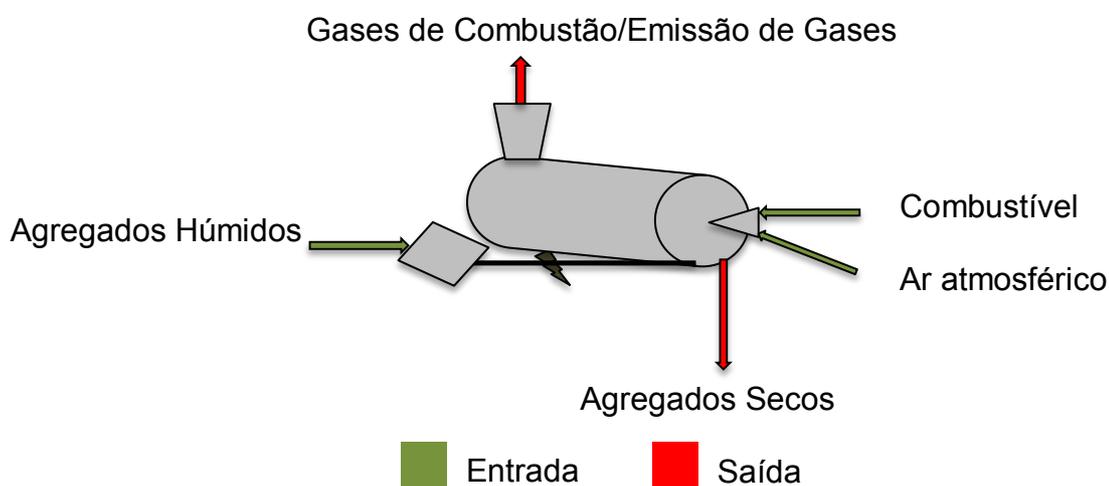


Figura 13 - Imagem representativa do cilindro exsicador

- Balanço mássico**

O balanço mássico foi concebido de acordo com o princípio de conservação de massa, com o objetivo de quantificar as composições mássicas dos diferentes intervenientes.

Através dos dados fornecidos pela Prioridade S.A., referentes à emissão de GEE (Tabela 9), determinou-se o rácio de ar seco pelo consumo de gás natural, através das operações realizadas indicadas a seguir.

Estes dados suscitaram algumas dúvidas, uma vez que as amostragens de GEE se realizam após o filtro de mangas e este possui um sistema de exaustão acoplado. Por conseguinte, os dados referentes à queima do combustível são influenciados pelo processo de secagem e pelo processo de retenção de partículas.

Supõe-se, deste modo, que o valor da humidade apresentada reflete quer a remoção da água proveniente da secagem dos agregados quer da combustão

do gás natural. Salva-se ainda a hipótese de alguma água ser retida no filtro de mangas.

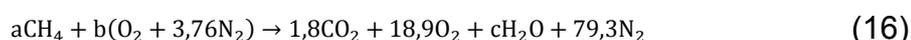
A determinação do rácio mássico surge no contexto de obter dados mais concretos relativos à instalação, que possam demonstrar características específicas do processo produtivo, os quais são utilizados no modelo térmico. Assume-se, deste modo, que a instalação opera com um rácio mássico e excesso de ar constante.

**Tabela 9 – Composição dos efluentes gasosos (dados fornecidos pela Prioridade S.A.)**

Ensaio	Base Húmida	Base Seca
Temperatura dos gases de emissão	83 °C	Determinado
H <sub>2</sub> O	9,5 %	-
O <sub>2</sub>	17,1 %	18,9%
CO <sub>2</sub>	1,6 %	1,8%
N <sub>2</sub> (Assumido pelo autor)	71,8 %	79,3%

Por intermédio da reação estequiométrica (16) determinaram-se os rácios em base molar (17) e mássica (18). Para as determinações referidas, assumiu-se que 3,76 moles de N<sub>2</sub> acompanham cada mole de O<sub>2</sub> no ar, e que o combustível é essencialmente composto por CH<sub>4</sub>.

As considerações e fórmulas utilizadas foram retiradas da bibliografia (Moran *et al.* 2010).



$$\text{Rácio Molar} = \left( \frac{b + (b \times 3,76)}{a} \right) \quad (17)$$

$$\text{Rácio mássico (Kg AR/ Kg combustível)} = \left( \frac{M_A \left( \frac{\text{kg Ar}}{\text{kmol}} \right)}{M_{\text{combustível}}} \right) \times \text{Rácio Molar} \quad (18)$$

A Equação (19) demonstra como se determinou a massa molar de combustível correspondente à composição enunciada.

$$M_{\text{combustível}} (\text{kg combustível kmol}^{-1}) = 4 \times 1,008 + 12,011 = 16,01 \quad (19)$$

Os valores de 1,008 e 12,011 correspondem à massa molar do H e C, respetivamente.

Seguidamente à obtenção do valor associado ao rácio mássico, obteve-se através da Equação (20) o ar seco correspondente ao consumo de gás natural.

$$\text{Ar seco (kg h}^{-1}\text{)} = \text{Rácio mássico} \left( \frac{\text{kg AR}}{\text{kg Combustível}} \right) \times \text{Consumo Gás Natural} \left( \frac{\text{kg combustível}}{\text{h}} \right) \quad (20)$$

De acordo com Matos (2011), a utilização de ar em excesso é extremamente importante para que, através da queima de gás natural para o processo de secagem, não se produzam não queimados gasosos e/ou sólidos, acompanhando os gases de escape ou cinzas.

A Utilização da equação (21) define o excesso de ar em questão.

$$\text{Excesso de ar (\%)} = 100 \times \left( \frac{w_a}{1 - w_s} \right) \quad (21)$$

Para a determinação do  $w_a$  e do  $w_s$  foram utilizadas as equações (22) e (23).

$$w_a \left( \frac{\text{kg de O}_2}{\text{kg combustível}} \right) = \frac{\text{Rácio Mássico} \left( \frac{\text{kg Ar Seco}}{\text{kg combustível}} \right)}{4,31} = \frac{\text{Rácio Mássico} \left( \frac{\text{kg Ar Seco}}{\text{kg combustível}} \right)}{\frac{M_A}{y_{O_2} M_{O_2}}} \quad (22)$$

O valor 4,31 representa a constante referente ao ar de combustão atmosférico, obtido pela substituição de  $M_A$  por 28,96 kg/kmol,  $y_{O_2}$  por 21 e  $M_{O_2}$  por 32 kgO<sub>2</sub>/kmol (Matos, 2011).

$$w_s \left( \frac{\text{kgO}_2 \text{ estequiométrico}}{\text{kg combustível}} \right) = 32 \times \left[ \sum \left( \frac{Y_{s,j} w_{jF}}{M_j} \right) - \frac{w_{OF}}{32} \right] \quad (23)$$

A designação do elemento químico  $j$  é referente ao: C, H e S.

Após a determinação do rácio mássico referente à instalação e com o excesso de ar constante, iniciou-se o tratamento do balanço mássico aos materiais.

O tratamento dos materiais foi realizado separando a componente húmida da seca. A húmida corresponde ao conteúdo em humidade que os materiais apresentam, e a seca corresponde apenas ao material seco, sem qualquer conteúdo em humidade.

As diferentes determinações foram associadas às entradas e saídas do cilindro exsiccador (Figura 13).

A determinação da quantidade de agregados secos foi realizada de acordo com a equação (24), representando a remoção da componente húmida do agregado.

$$\text{Massa de Agregados Secos} = \text{Massa de Agregados húmidos} \times (1 - \text{Humidade(\%)}) \quad (24)$$

O fornecimento de combustível ao queimador do cilindro foi determinado a partir do consumo de gás natural (em kg h<sup>-1</sup>, segundo a equação (25)). Após a

obtenção do caudal de gás natural decompôs-se nos seus constituintes através da equação (26), por intermédio da Tabela 10.

$$\text{Consumo Gás Natural (kg h}^{-1}\text{)} = \frac{Q_{\text{GásNatural}} (\text{MJ h}^{-1})}{45,1 (\text{MJ kg}^{-1})} \quad (25)$$

$$\text{Constituinte Fornecido (kg h}^{-1}\text{)} = \% \text{ constituinte } i \times \text{Consumo de Gás Natural (kg h}^{-1}\text{)} \quad (26)$$

O valor de 45,1 (MJ kg<sup>-1</sup>) foi retirado do Despacho n.º 17313/2008.

**Tabela 10 – Composição Molar de Gás natural seco distribuído em Portugal (Matos, 2012):**

Constituintes (i)	Composição molar
CH <sub>4</sub>	0,837
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,076
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,019
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,010
N <sub>2</sub>	0,056
CO <sub>2</sub>	0,002
H <sub>2</sub>	0,000
CO	0,000

Para determinar os gases de exaustão do cilindro foi utilizada a reação estequiométrica da equação (27) (Matos, 2011).

$$\left( \frac{W_{CF}}{12}, \frac{W_{HF}}{2}, \frac{W_{OF}}{32}, \frac{W_{NF}}{28}, \frac{W_{SF}}{32}, W_{ZF}, \frac{W_{WF}}{18} \right) + \left( \frac{W_a}{32} \right) [1(O_2) + 3,76(N_2) + 7,66W_{VA}(H_2O)] \quad (27)$$

$$= n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{CO} + n_{H_2} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{SO_2}$$

Por sua vez, sabendo que  $w_{ZF}=0$  (sem produção de cinzas), admitindo combustão completa ( $n_{CO}=n_{H_2}=0$ ), com  $w_{VA} = 0,015$  (diagrama psicrométrico) e  $w_{WF} = 0,25$  (assumindo o fornecimento de gás natural como seco, mas com alguma humidade no ar de combustão), a determinação dos compostos químicos enumerados anteriormente foram realizados segundo as equações (28), (29), (30), (31) e (32) (kmol/kg) (Matos, 2011).

$$n_{CO_2} = \frac{W_{CF}}{12} - n_{CO} \quad (28)$$

$$n_{H_2O} = n_{H_2} - \frac{W_{HF}}{2} - \frac{W_{WF}}{18} + \left( \frac{W_a}{32} \right) \times W_{VA} \times 7,66 \quad (29)$$

$$n_{O_2} = \frac{W_{OF}}{32} + 0,5 \times \frac{W_{WF}}{18} + \left( \frac{W_a}{32} \right) \times (1 + 0,5 \times W_{VA} \times 7,66) - (n_{CO_2} + n_{H_2O}/2 + n_{SO_2}) \quad (30)$$

$$n_{N_2} = \frac{w_{NF}}{28} + \left( \frac{w_a}{32} \right) \times 3,76 \quad (31)$$

$$n_{SO_2} = \frac{w_{SF}}{32} \quad (32)$$

A Tabela 11 apresenta os valores a utilizar nos teores ponderais mássicos respetivos.

**Tabela 11 - Teores ponderais mássicos correspondentes a cada elemento químico**

$w_{CF}$	$w_{HR}$	$w_{OR}$	$w_{NR}$	$w_{SR}$
(kg C/kg combustível bs)	(kg H/kg combustível bs)	(kg O/kg combustível bs)	(kg N/kg combustível bs)	(kg S/kg combustível bs)
0,697	0,216	0,003	0,084	0,000

Para consumir o objetivo de distribuir a emissão dos gases de exaustão, utilizou-se a quantidade de cada componente em base seca (equação (33)) distribuído pelo caudal de entrada (equação (34)).

$$\% \text{componente emitido} = \frac{\text{componente (i)}}{\Sigma \text{componentes (i)}} \quad (33)$$

O *componente (i)* é referente ao número de moles obtido para a combustão completa do gás natural ( $n_{(i)}$ ).

A emissão do conteúdo em água total, tem de ter em conta a água proveniente do processo de combustão, bem como a que está associada aos agregados no processo de secagem e sobreaquecimento (equação (35)).

$$\text{Emissão de gases (kg h}^{-1}\text{)} = \% \text{ componente emitido} \times \text{consumo de gás natural (kg h}^{-1}\text{)} \quad (34)$$

$$= \text{Emissão gases (H}_2\text{O)} (\text{kg h}^{-1}) + \left( \frac{\text{Emissão de H}_2\text{O (kg h}^{-1}\text{)}}{\text{Caudal mássico de Agregados Húmidos}} \times \text{Humidade}(\%) \right) \quad (35)$$

- **Balço energético**

O balanço energético traduz o princípio geral de conservação de energia, com pressão constante, onde por norma se despreza os termos correspondentes à energia cinética, potencial e de mistura (Matos, 2011).

O modelo térmico realizado teve por base a equação (36) e, deste modo, a sua função principal foi de demonstrar a necessidade energética correspondente a cada componente seco.

$$Q_{\text{agregado seco}} = m_{\text{agregado}} c_p \Delta T \quad (36)$$

O  $m_{agregado}$  (kg) corresponde à massa do agregado seco, o  $c_p$  corresponde ao calor específico do agregado, que se encontra determinado na secção 4.5. E o  $\Delta T$  (K) corresponde à diferença de temperatura que o agregado sofre na secagem e sobreaquecimento, entre a temperatura de entrada do agregado e a temperatura a que é elevado.

Como aconteceu no balanço mássico, no que concerne à separação dos elementos secos e húmidos, a água sofreu um tratamento separado, associando-se a humidade de entrada de cada agregado à humidade que tem de ser removida pelo processo. Para a realização desta operação é necessário determinar a energia necessária para o aquecimento da água do agregado até à ebulição e a energia necessária à sua evaporação (equação (37)).

$$Q_{H_2O} \text{ (kJ)} = \Sigma (m_{H_2O \text{ agregados}}) c_{p_{H_2O}} (T_i - 105) + \Sigma (m_{H_2O \text{ agregados}}) L_v \quad (37)$$

O  $c_{p_{H_2O}}$  corresponde ao calor específico da água, determinado na secção 4.5, e o  $L_v$  o calor latente de evaporação da água ( $L_v = 2440 \text{ kJ kg}^{-1}$ ). A necessidade energética total para secar e sobreaquecer os agregados pode ser definida segundo a equação (38).

$$Q_{\text{Aquecimento}_{\text{Total}}} \text{ (kJ)} = Q_{\text{agregado seco}} + Q_{H_2O} \quad (38)$$

A equação anterior quantifica a energia necessária para secar e sobreaquecer os agregados, mas terá de se determinar a energia que terá de ser fornecida pelo queimador do cilindro exsicador para suprir a necessidade energética total de secagem e aquecimento. Assim sendo, a energia fornecida pela combustão do gás natural do cilindro exsicador foi obtida através da equação (39).

$$Q_{\text{cilindro exsicador}} \text{ (kJ h}^{-1}\text{)} = 1,25 \times \left( \frac{(T_{\text{operação}} \text{ (}^\circ\text{C)} - T_{\text{Gás Natural}} \text{ (}^\circ\text{C)})}{(T_{\text{operação}} \text{ (}^\circ\text{C)} - T_{\text{saída gases}} \text{ (}^\circ\text{C)})} \right) \times Q_{\text{Aquecimento}_{\text{Total}}} \quad (39)$$

O valor 1,25 corresponde à energia perdida por convecção, condução e ineficiências associadas ao processo de secagem pelo cilindro exsicador em Land (2012). A  $T_{\text{operação}}$  foi determinada segundo Baptista (2006) através da equação (40).

$$T_{\text{operação}} \text{ (}^\circ\text{C)} = \frac{\left( \left( \left( T_m + \Delta T_m - \frac{R \times \omega \times (c_{p_{H_2O}} \times (T_F - 100) - l_v)}{c_a + R \times c_F} \right) \times (c_a + R \times c_F) \right) - R \times c_F \times T_F \right)}{c_a} \quad (40)$$

O  $R$  foi determinado segundo a equação (41), e o  $c_a$  através da Equação (42). O  $c_{p_{agregado}}$  e  $c_f$  foram determinados segundo a secção 4.5.

$$R = \frac{m_{\text{Fresado}}}{m_{\text{Agregados}}} \quad (41)$$

$$c_a = \sum (\% \text{ agregado mistura}(i) \cdot cp_{\text{agregado}}(i)) \quad (42)$$

Para determinar a energia associada ao ar seco de entrada no queimador do cilindro exsicador (equação (43)) utilizou-se o  $cp$  do ar como constante (1,005).

$$Q_{\text{ar}} = cp_{\text{ar}} \cdot m_{\text{ArSeco}} \cdot (T_{\text{operação}} - T_{\text{entrada}}) \quad (43)$$

Através do presente balanço mássico e energético determinou-se o consumo de gás natural e o custo associado. Para tal utilizou-se a equação (44) para converter o consumo para  $\text{m}^3/\text{h}$  e a equação (45) para converter o consumo para  $\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ .

$$Q_{\text{GásNatural}}(\text{m}^3 \text{ h}^{-1}) = Q_{\text{GásNatural}}(\text{kg h}^{-1}) \times 0,8404(\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}) \quad (44)$$

$$Q_{\text{GásNatural}}(\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}) = \frac{Q_{\text{GásNatural}}(\text{m}^3 \text{ h}^{-1})}{(T_{\text{fornecimentoGás}} + 273,15)} \times (T_{\text{operação}} + 273,15) \quad (45)$$

O custo com o gás natural foi determinado segundo a equação (46), em que  $0,607 \text{ €/Nm}^3$ , corresponde ao valor médio de custo de gás natural referente ao ano transato.

$$\text{Custo}_{\text{GásNatural}}(\text{€}) = 0,607 (\text{€ Nm}^{-3}) \times Q_{\text{GásNatural}}(\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}) \times \frac{\text{Tempo Funcionamento cilindro (min)}}{60 (\text{s})} \quad (46)$$

Nesta equação o *Tempo de Funcionamento do Cilindro (min)* (equação (47)) é referente às condições do próprio cilindro exsicador, ou seja, tem em conta o tempo de mistura e a quantidade de agregados que consegue secar e sobreaquecer durante o tempo de mistura.

Assim sendo, o tempo de mistura estipulado é de 42 s, o 60 é referente à conversão do tempo para minutos, e a capacidade do cilindro exsicador utilizado é de 2000 kg.

$$\text{Tempo de mistura cilindro (min)} = ((\text{Produção total diária (kg)} - \text{Inclusão betume novo (kg)}) \times \left( \frac{\left( \frac{42 (\text{s})}{60 (\text{s})} \right)}{(2000 (\text{kg}))} \right)) \quad (47)$$

Posteriormente determinou-se a energia associada aos gases de exaustão (equação (48)), determinando-se quais os componentes que retêm maior energia (equação (49)).

$$Q_{\text{emissão de gases}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right) = Q_{\text{cilindroExsicador}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right) - \Sigma (m_{\text{H}_2\text{O}_{\text{agregados}}}) \times L_v - \text{Perdas} - Q_{\text{AgregadoSeco}} \quad (48)$$

$$\text{Emissão de gases} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right) = \% \text{ componente emitido} \times \text{consumo de gás natural} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right) \quad (49)$$

A Temperatura de Exaustão de gases (equação (50)) foi determinada segundo Land (2012) ,

$$T_{\text{ExaustãoGases}} = 0,05 T_{\text{Operação}} + 64,5 \quad (50)$$

#### **4.5 Análise aos calores específicos dos agregados que compõem as misturas de massas asfálticas via DSC;**

O  $cp$  encontra-se definido pela quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de 1 kg de um dado material em 1°C.

Schärli e Rybach (2001) evidenciam que a influência do conteúdo em humidade na determinação do  $cp$ , de entre inúmeras características que as rochas apresentem, depende não só da porosidade mas também da litologia. Outra característica que influencia o seu valor, segundo Waples e Waples (2004), é a densidade.

Com o enumerado acima, as análises tiveram de sofrer diferentes tratamentos e diferentes metodologias para atingir o objetivo pretendido, descrevendo-se as tarefas enunciadas ao longo do presente capítulo.

De acordo com as equações (51) e (52) o componente mais importantes na determinação da quantidade energética será o calor específico associado ( $cp$ ) a três componentes diferentes: aos agregados, ao reciclado/fresado e à água. A água terá um tratamento diferente, uma vez que sofre uma mudança de fase (líquido – vapor) e deste modo será separado nas duas fases.

$$Q_{\text{total aquecimento}} (\text{MJ}) = (Q_{\text{aquecimento da água}} + Q_{\text{vaporização água}} + Q_{\text{agregado seco}}) \quad (51)$$

$$Q_{\text{total aquecimento}} (\text{MJ}) = ((m_{\text{água}} cp_{\text{água}} \Delta T_{\text{água}}) + (m_{\text{água}} L_v) + (m_{\text{agregado}} cp_{\text{agregado}} \Delta T_{\text{agregado}})) \quad (52)$$

Os agregados estudados (Tabela 12) foram sujeitos a alguns testes de forma a verificar o comportamento energético e o comportamento ao nível da remoção da humidade.

**Tabela 12 – Algumas características dos agregados analisados (Dados fornecidos pela Prioridade S.A.)**

Designação	Dimensão (d/D) <sup>1</sup>	Massa Volúmica (mg/m <sup>3</sup> )	Absorção em água (%) WA <sub>24</sub> <sup>2</sup>
Calcário Pó 0/4	0/32	2,66	0,5
Material Fresado Proveniente do material de fresagem			
Areia	0/2	2,65	0,5
Granito	4/8	2,65	0,2 – 1
Seixo	4/16	2,65	0,8
Calcário	4/8	2,7	2,7

Os agregados (Figura 14 e Tabela 13) foram processados através de duas vias: húmida e seca. A via húmida é referente ao processo de submersão dos agregados e fresado durante 24h, em água, individualmente. O processamento por via seca é referente à remoção da humidade total dos agregados (24h na estufa, a 185°C).

**Tabela 13 - Imagens dos materiais analisados**



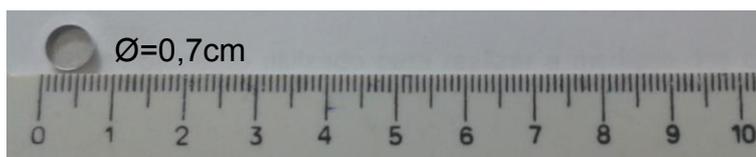
<sup>1</sup> Agregados com determinado diâmetro passam entre os peneiro “d” e ficam retidos em “D”(Ferreira and Branco, 2009)

<sup>2</sup> WA<sub>24</sub> – Percentagem de água absorvida durante a imersão do agregado durante 24h em água



**Figura 14 – Tratamento de amostras analisadas (via húmida)**

Os agregados sofreram um processo de redução de tamanho (Tabela 13 e Figura 14), com o objetivo de inserir o material processado no respetivo cadinho (Figura 15) por forma, a ser analisado no *DSC* (*Differential Scanning Calorimetry*).



**Figura 15 - imagem comparativa do cadinho do *DSC***

A montante do processo de análise, foi realizada uma caracterização referente à humidade presente no material antes de sofrer qualquer tipo de processo de secagem ou humedificação.

A determinação da humidade das amostras foi realizada mediante o seguinte método:

- Primeiramente os agregados, após sofrerem o processo de trituração, foram pesados;
- Posteriormente foram deixados dentro de uma estufa durante 72h a 105°C (Figura 14);
- Por fim, após as 72h foram novamente pesados e determinada a humidade presente nos mesmos (Equação (53)).

$$\% \text{ Humidade} = \left( \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} \right) \quad (53)$$

Seguidamente os agregados e fresado sofreram o processamento referente à via húmida, ou seja, foram colocados dentro de um recipiente (Figura 14) e submersos em água durante 24 horas.

Após 24 horas submersos, a água foi retirada dos recipientes, deixando apenas os materiais. As partículas de agregados e fresado húmidas foram retiradas por intermédio de uma pinça e colocadas dentro de cada cadinho

individualmente. Posteriormente foram pesadas antes do processo de medição (Tabela 14).

**Tabela 14 - Massa das amostras analisadas DSC – Via Húmida**

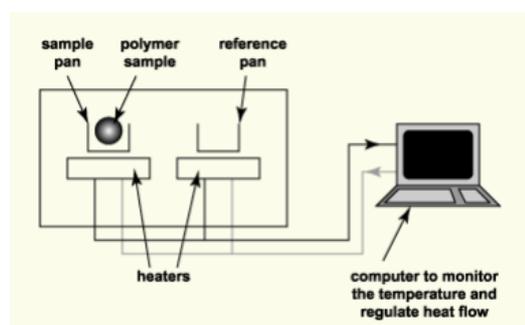
Componente	Água	Pó Calcário	Fresado	Areia	Granito	Seixo	Calcário
$m_{\text{inicial}}$ (mg) – Via húmida	69,4	106,2	106,8	103,3	87,4	85,4	98,8

As análises através do DSC foram realizadas com os cadinhos “abertos” para que a amostragem fosse representativa, ficando limitadas ao tamanho do mesmo.

O equipamento utilizado para realizar a medição dos calores específicos dos agregados e fresado foi o DSC-STA 6000 (*DSC - Simultaneous Thermal Analyzer 6000*).

O DSC (Figura 16) é uma técnica que determina a capacidade calorífica de um material ( $cp$ ) em função da variação da temperatura.

O DSC pode ser definido como um método de variação entálpica, no qual é medida a diferença entre a energia calorífica fornecida a uma dada amostra e um dado material de referência, em função da temperatura (FCT, 2014).



**Figura 16 - Funcionamento de um DSC (DSC - TGA, [s.d.]**

Após a realização das análises aos agregados e fresado, retiraram-se os ficheiros associados à medição e foram transformados em formato MSEXcel (Tabela 15). Os ficheiros foram utilizados para determinar o valor de  $cp$  associado a cada amostra através das equações (55) e (56).

A energia *unsubtracted* é referente à energia que a amostra necessita para elevar a temperatura, e a energia referente à *baseline* é a energia referente apenas ao aquecimento do cadinho. O valor real correspondente à energia total necessária para elevar a temperatura da amostra em 1°C é a diferença entre ambas (54).

**Tabela 15 - Determinação de  $cp$**

Tempo	Energia (mW)			Calor Específico	
	Unsubtracted	Baseline	total	$cp$ (kJ kg <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup> )	$cp$ (kcal kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> )
Time					

$$\text{Energia total (mW)} = (\text{Unsubtracted} - \text{Baseline}) \quad (54)$$

$$cp \text{ (kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Energia total (mW)}}{\left(\frac{\text{massa amostra (mg)}}{(\text{Ciclo térmico}) \times 60\text{s}}\right)} \quad (55)$$

$$cp \text{ (kcal kg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)} = \frac{cp \text{ (kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}}{4,186 \text{ (kJ kcal}^{-1}\text{)}} \quad (56)$$

Após à obtenção dos diversos resultados de  $cp$  foram realizados gráficos de forma a verificar o comportamento das amostras mediante o aumento da temperatura, retirando as equações referentes a cada curva para posterior utilização no modelo térmico.

As amostras analisadas por via seca sofreram um processo de tratamento para que se encontrassem totalmente secas, sem qualquer conteúdo em humidade. Após o arrefecimento das amostras, efetuou-se a análise no *DSC* através dos mesmos procedimentos enumerados para a via húmida.

A Tabela 16 mostra os valores das massas das amostras antes da análise de *DSC*.

**Tabela 16 - Massa das amostras analisadas *DSC* - Via Seca**

Componente	Água	Pó Calcário	Fresado	Areia	Granito	Seixo	Calcário
$m_{\text{inicial}}$ (mg) – Via Seca	(-)	32,1	53,3	64,9	64,2	73	53,5

Os valores obtidos foram comparados com os encontrados na bibliografia de forma a verificar a proximidade dos valores obtidos (Tabela 17).

**Tabela 17 - Calores Específicos<sup>3</sup> de algumas substâncias a 20 °C e Pressão atmosférica**

Substância	Calor Específico		Medido <i>DSC</i>	
	(kcal kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	(kcal kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
<b>Asfalto</b>	0,22	0,92	-	-
Cimento Seco	0,37	1,55	-	-
Carvão, Betuminoso	0,33	1,38	-	-
<b>Granito</b>	0,19	0,79	0,22	0,92
<b>Calcário</b>	0,21	0,90	0,18	0,75
Borracha	0,48	2,01	-	-
<b>Areia Seca</b>	0,19	0,80	0,22	0,95
<b>Pedra</b>	0,20	0,84	-	-

<sup>3</sup> (*engineeringtoolbox.com*, [s.d.]) e (Waples and Waples, 2004)

#### **4.6 Realização de um modelo térmico teórico**

O processo de secagem refere-se ao fenómeno de remoção de água de uma substância.

O ponto relevante referente ao trabalho prende-se com o facto do consumo energético no secador depender do conteúdo em humidade e do calor específico que os agregados possam apresentar.

Alguns cientistas enumeraram vários modelos matemáticos para determinar o comportamento dos materiais no processo de secagem, sejam eles de origem mineral ou não. Luikov (1975) formulou um modelo matemático que se baseia em equações diferenciais para determinar o comportamento de corpos com porosidade capilar e Whitaker (1977) descreveu um modelo de secagem de meios porosos.

Com o decorrer dos anos outros estudos têm surgido outros estudos (como por exemplo Wang, Ma e Chen, (2011) e Kowalski, (2007)) os quais têm tido por base os autores referidos no parágrafo anterior. Inúmeros modelos matemáticos têm sido desenvolvidos neste campo, face à necessidade de conhecimento do processo de secagem para minimizar os consumos energéticos associados ao processo.

Grande parte dos modelos matemáticos utilizados estão associados a um tipo específico de produto e equipamento, estando desta forma longe de existir um modelo único de secagem (Kowalski, 2007).

O fabrico de massas asfálticas a quente em central fixa pode ser resumido pela mistura de diversos materiais a diferentes temperaturas obtendo-se um produto homogéneo a uma só temperatura. O balanço térmico realizado pode ser adaptado a diversas centrais de produção de massas asfálticas com inclusão de reciclado, mas tem de ter em conta as perdas associadas a cada processo e o tipo de central ao nível de dimensionamento e tipo de produção. A temperatura final da mistura betuminosa depende da temperatura inicial dos diferentes materiais que compõem as massas asfálticas, das características térmicas dos constituintes e da humidade do material fresado (Baptista, 2006), e também da distância que as misturas têm de percorrer para a sua aplicação.

Algumas precauções têm de ser tomadas, pois segundo o que Rubio (2003) refere, citado em Baptista (2006), o reciclado deve ser alvo de especial atenção, pois contém betume na sua constituição. Apesar de envelhecido, a sua temperatura não deve ultrapassar os 275 °C, que é muito superior ao limite de inflamação de um betume virgem.

Um agregado, mediante a sua constituição física, apresenta alguma humidade nos espaços intersticiais (“humidade ligada”), bem como à superfície (“humidade livre”) e, por conseguinte, o processo de secagem realiza-se em duas etapas (Mujumdar, 2006). A primeira etapa é referente à energia que é transferida do espaço interior do cilindro aquecido, proveniente da reação de combustão de gás natural, para a superfície dos sólidos. Aí ocorre a remoção da humidade presente na superfície do agregado sob a forma de vapor, estando esta dependente da influência da temperatura, da humidade do ar, do

caudal, da área da superfície exposta e da pressão a que se encontra a envolvente exterior dos agregados.

A segunda etapa é referente à transferência da humidade presente nos espaços intersticiais (interior dos agregados) para a sua superfície e posterior evaporação. O processo referenciado é influenciado pela movimentação do cilindro, composição física do agregado, temperatura a que se encontra sujeito e quantidade de humidade que apresenta (Mujumdar, 2006).

Deste modo, para a realização do modelo térmico teórico ao cilindro exsicador, teve-se por base as leis de conservação de massa e de energia, assumindo que toda a energia e massa de entrada é igual à de saída, removendo a totalidade da água que entra no sistema, saindo os agregados totalmente secos, sendo a combustão, realizada pelo queimador do cilindro exsicador, completa (sem emissão de CO, SO<sub>2</sub>, entre outros).

O modelo térmico (Figura 17 - 19) foi realizado tendo por base bibliografia da especialidade referente ao processo de secagem através de um cilindro associado à produção de massas asfálticas com inclusão de reciclado a frio. As diferentes figuras representam o modelo térmico realizado no *Excel*, ilustrando, desta forma, os principais *separadores* que constituem o modelo. A Figura 17 mostra o separador inicial do modelo, que contém a quantidade total de produção de uma determinada mistura, a composição da mistura pretendida, o conteúdo em humidade e o custo associado a cada material. Também apresenta as temperaturas a que cada componente se encontra, e até que temperatura se pretende aquecer para obter o equilíbrio térmico, ou seja, temperatura final da mistura.

A Figura 17 demonstra ainda alguns resultados, tais como: a temperatura que tem de ser selecionada no cilindro exsicador, que é obtida em função da temperatura final da mistura; o custo de produção total (matérias primas e consumo de gás natural); e o consumo e custo com o gás natural.

Entrada		Saída		Perdas		Valores a inserir	
Agregados - Determinação Laboratório							
	CP(kg/kg) (Para temperatura de aquecimento)	Humidades LABORATÓRIO	Custo (€/ton)	Relação			
Calcario pó	1,100	0,00%	1,85 €	-			
Granito	0,954	0,00%	6,50 €	-			
Calcario	0,732	0,00%	3,35 €	-			
Areia	1,237	0,00%	4,50 €	-			
Seixo	0,790	0,00%	6,20 €	-			
Filer	-	-	- €	3%			
Betume Novo	-	-	470,00 €	50	kg betume/ 1000 kg de massas produzidas		
Fresado Frio	0,913	0,00%	4,90 €	-			
Água	#DIV/0!	-	-	-			
Composição misturas							
Quantidade				Consumo m <sup>3</sup> /ton produzidas			
Produção Total diária (Húmido)	0	ton		#DIV/0!			
Produção Horária	0,0	ton/h					
Custo (€/Nm <sup>3</sup> )	0,607						
Tempo de Funcionamento cilindro				0,0	min		
Seleção de Misturas							
Componente			Custo (€/ton)				
Calcario pó	20%		1,85 €				
Calcario	20%		3,35 €				
Areia	30%		4,50 €				
Seixo	30%		6,20 €				
Fresado Frio	30%		4,90 €				
Filer	0,00	ton	- €				
Betume novo	0,00	ton	470,00 €				
	30%						
Processo Especificações							
Temperatura de entrada Agregados	0	°C					
Temperatura de entrada Gás Natural	0	°C					
Temperatura de operação cilindro	#DIV/0!	°C					
Temperatura Requerida para Equilíbrio térmico (Agregados+Fresado)	0	°C					
Humidade Relativa do Ar	50%						
Temperatura do Fresado	0	°C					
Custo de Produção							
	Consumo m <sup>3</sup>	Consumo Nm <sup>3</sup>	Custo Gás Natural				
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!				

Figura 17 - Página inicial do modelo térmico

A Figura 18 representa o modelo mássico associado a todos os componentes intervenientes no processo de secagem e aquecimento, demonstrando o consumo e a emissão proveniente da combustão do gás natural no processo.

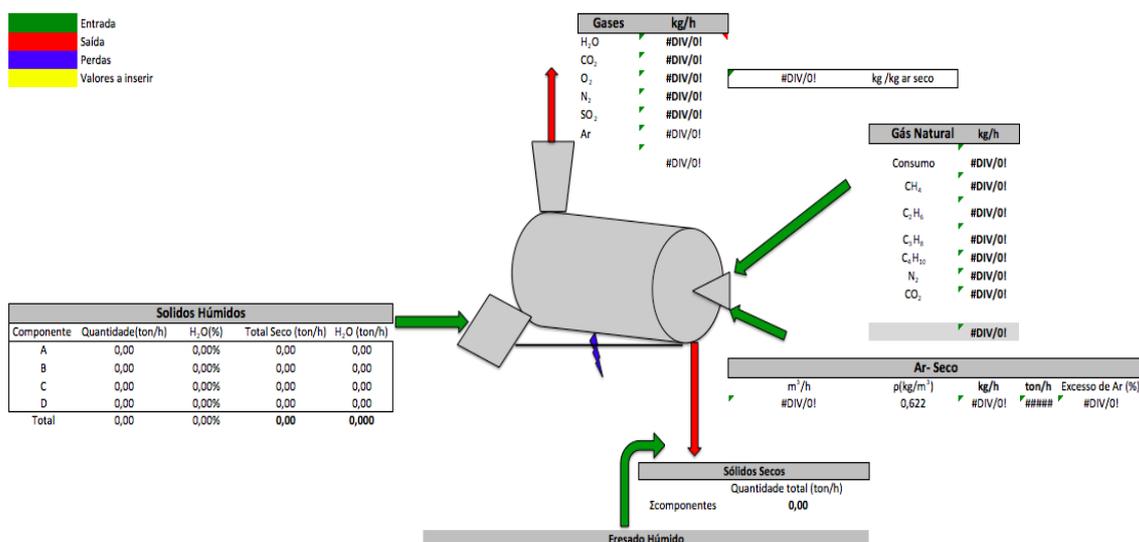


Figura 18 - Página do modelo para a massa

A Figura 19 representa a necessidade energética e inerentes ao processo de secagem e aquecimento dos materiais com as misturas selecionadas, demonstrando também as temperaturas (inicial, aquecimento e final).

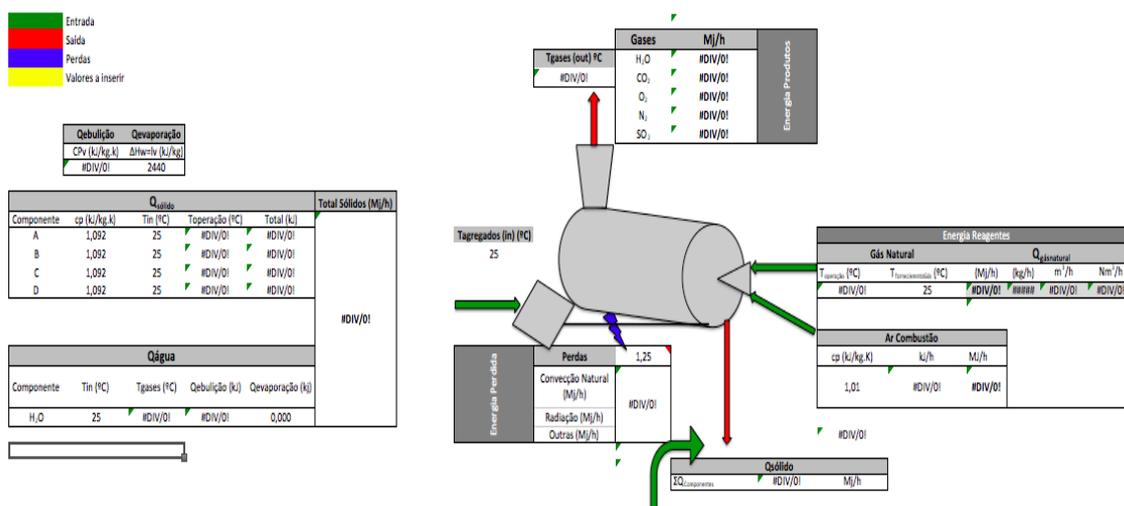


Figura 19 - Página do modelo para a energia

O modelo térmico tem em conta a remoção da humidade de que o fresado necessite, estando adaptado para as condições de operação do cilindro exsiccador apresentadas nas especificações do manual de operador. Encontra-se definido que para uma capacidade de 2000 kg, o tempo de mistura é de 42 segundos e a velocidade de produção é de 160 ton/h.

O modelo térmico tem por base os balanços mássico e energético anteriormente realizado, relacionando os diferentes componentes e variando a necessidade energética em função do conteúdo em humidade. O modelo também tem em conta as diferentes equações obtidas pela determinação do

calor específico dos agregados e fresado, em que as temperaturas utilizadas, para essa determinação, são correspondentes à temperatura final da mistura, para que exista uma maior proximidade do  $c_p$  real do material específico.

Para além da relação existente entre o balanço energético e mássico, existe também uma necessidade de integrar os componentes associados ao consumo das matérias primas, ou seja, a introdução de *fíler* na mistura, que corresponde a 3% das massas asfálticas a produzir, e de betume, que corresponde a 50 kg por cada 1000 kg de mistura a produzir; Os custos associados às matérias-primas utilizados na modelação (Tabela 18) foram fornecidos pela Prioridade.

**Tabela 18 - Valores utilizados para determinação de custos de produção de massas asfálticas**

Componente	Custo (€/ton)
Pó Calcário	1,85
Granito	6,50
Calcário	3,35
Seixo	6,20
Areia	4,50
Fresado	4,90
Betume	470,00

O modelo realizado permite seleccionar os seguintes parâmetros:

- diferentes tipos de materiais associados à mistura;
- percentagens de composição das misturas;
- custo associado a cada componente das misturas;
- teor em humidade que as misturas apresentam;
- conteúdo em betume e fíler a adicionar;
- características de operação do cilindro exsiccador;
- temperatura pretendida da mistura final.

e tenta prever:

- tempo de funcionamento do cilindro exsiccador para realizar o processo de secagem e sobreaquecimento;
- os consumos energéticos de gás natural;
- os consumos associados às matérias primas;
- a temperatura a que os agregados têm de ser aquecidos para obter a temperatura final da mistura, aquando da adição do fresado;
- os balanços mássico (Figura 18) e energético (Figura 19) associados à secagem e sobreaquecimento;
- a necessidade de excesso de ar para o processo de combustão;
- a quantificação da emissão dos GEE;
- ao nível do *SGCIE*, os consumos em **tep** e emissões em **kgCO<sub>2</sub>** associadas à produção a realizar;
- o custo associado ao consumo do Gás Natural e o custo de produção.

#### 4.7 Estudo da viabilidade de substituição da caldeira de aquecimento de óleo térmico

A presente secção visa avaliar o potencial de substituição do combustível da caldeira de aquecimento de óleo térmico de gás natural para biomassa.

A necessidade de alteração do consumo de gás natural para biomassa é importante não só a nível económico e energético, mas também a nível ambiental. A crescente necessidade de reduzir consumos energéticos influenciou a emissão de legislação europeia e nacional que incide na redução de consumos energéticos e influencia os grandes consumidores de energia a apostarem na eficiência energética para a sustentabilidade.

O recurso à Biomassa como combustível permite resolver três pontos essenciais para as empresas: a questão económica, a energética e a ambiental.

A Figura 20 descreve os processos referentes à utilização de biomassa sólida e às formas disponíveis de conversão.



Figura 20 – Descrição de processo de conversão de Biomassa (Energiasrenovaveis, 2014)

A biomassa sólida pode sofrer um processo de conversão física, sendo transformada em estilha, *pellets*, briquetes, entre outros, de forma a ser utilizada como combustível.

O tipo de conversão influenciará as características intrínsecas da biomassa, repercutindo-se no processo de conversão termoquímico, em diferentes aspetos: teor em cinzas, o teor de humidade e o poder calorífico. Os tipos de

combustíveis oriundos de fontes renováveis mais utilizados em ambientes fabris são a biomassa florestal, estilha e os *pellets* (Figura 21). De entre os três tipos de combustível convertido, os *pellets* são os que possuem maior poder calorífico, menor teor em humidade, menor teor em cinzas e proporcionam uma melhor combustão (Ventil, 2012).



Figura 21 - Tipos de conversão de biomassa sólida (Ventil, 2012)

Tabela 19 - caracterização conversão biomassa sólida (ForesTech, [s.d.])

Conversão sólidos	Características
<b>Biomassa Florestal</b> – fração biodegradável da floresta, como por exemplo a limpeza das florestas (Silvaplus, 2014).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor de humidade = 20 a 30 %</li> <li>• Densidade Aparente = 300 kg m<sup>-3</sup></li> <li>• Poder Calorífico = 13 a 15 MJ kg<sup>-1</sup></li> <li>• Densidade energética = 4 GJ m<sup>-3</sup></li> </ul>
<b>Estilha de madeira</b> – produzidas a partir de resíduos do processamento de madeira, oriundas da transformação da madeira para utilização pretendida (Energiasrenovaveis, 2014).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teor em cinzas &lt; a 1%</li> <li>• Densidade Aparente = 250 a 300 kg m<sup>-3</sup></li> <li>• Poder Calorífico = 17 MJ kg<sup>-1</sup></li> <li>• Densidade energética = GJ m<sup>-3</sup></li> <li>• Humidade &lt; 25%</li> <li>• Preço médio = 80 € ton<sup>-1</sup></li> </ul>
<b>Pellet</b> – são combustíveis de madeira compactos, provenientes da compactação de pó e serradura de madeira (Energiasrenovaveis, 2014).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preço médio = 170 € ton<sup>-1</sup></li> </ul> Normas Internacionais standards (CEN): <ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidade Aparente = 600 kg m<sup>-3</sup></li> <li>• Poder Calorífico = 18 MJ kg<sup>-1</sup></li> <li>• Teor de Cinza &lt; a 1%</li> <li>• Humidade &lt; 10%</li> <li>• Densidade energética = 10 GJ m<sup>-3</sup></li> </ul>

Para o estudo em questão, é importante ter em conta o tipo de combustível, não só no que se refere às suas propriedades intrínsecas, mas também, e mais importante para as empresas, o seu custo, bem como o transporte dos resíduos resultantes do processo de combustão para locais adequados.

A seleção do tipo de combustível (Tabela 19) foi determinada tendo em atenção o tipo de conversão necessário em função do tipo de aquecimento pretendido. Os combustíveis selecionados para a realização do estudo foram os *pellets* e a estilha, justificados pelo seu poder calorífico aproximado e baixo teor em cinzas, evidenciando o facto da caldeira estudada possibilitar a utilização de ambos os tipos de combustível.

O processo termoquímico da caldeira estudada é de combustão de biomassa,

podendo o seu combustível ser *pellets* ou estilha, e tem por objetivo a manutenção da temperatura do aquecimento de betume para incorporar posteriormente nas massas asfálticas.

Para auxiliar o estudo de substituição da caldeira de gás natural para biomassa, utilizou-se o *RETSscreen* como *software* de apoio.

The screenshot shows the RETScreen International software interface. At the top, there are logos for Natural Resources Canada and the word 'Canada'. The main header reads 'RETScreen® International' with the website 'www.retscreen.net' and the subtitle 'Software de Análise de Projetos de Energia Limpa'. The interface is divided into two main sections: 'Informação sobre o projeto' and 'Condições de Referência do site'. The 'Informação sobre o projeto' section includes fields for 'Nome do Projeto' (Aquecimento óleo térmico), 'Localização do Projeto' (CACIA), 'Preparado para' (PRIORIDADE), 'Tipo de projeto' (Definido pelo usuário), 'Tipo de análise' (Método 1), 'Poder calorífico de referência' (Poder Calorífico Inferior (PCI)), 'Ver parâmetros' (checked), 'Idioma' (Portuguese - Português), 'Manual do usuário' (English - Inglês), 'Moeda' (Euro), and 'Unidades' (Unidades métricas). The 'Condições de Referência do site' section includes 'Localização dos dados climáticos' (Coimbra) and 'Mostrar dado' (checked). A background image of a wind turbine is visible on the right side of the interface.

**Figura 22 - Imagem do *software* de apoio ao estudo da caldeira**

O *RETSscreen* é um *software* específico para análise de projetos de energia limpa, em que a sua base de utilização é o Excel. O objetivo do *RETSscreen* é de auxiliar a avaliação das potencialidades do projeto de forma rápida e económica, bem como a, viabilidade técnica, económica e a eficiência energética, permitindo também avaliar o desempenho das medidas implementadas constantemente (*RETSscreen Internacional*, 2013).

O presente estudo teve por base o contacto direto com a empresa *Ventil – Engenharia do Ambiente*, onde foram debatidos modos de funcionamento, tipos de caldeira que possuem e custos com os combustíveis selecionados. A partir do orçamento fornecido e das condições de operação da caldeira aconselhada pela *Ventil* (Tabela 20), o estudo foi transposto para o *RETSscreen*, onde se analisou os diferentes custos e consumos, bem como as poupanças e previsões de retorno de investimento.

**Tabela 20 - Características da caldeira de substituição (Dados Fornecidos pela Ventil, Lda)**

Potência Fornalha (kW)	350
Combustível	Estilha e Pellet
Constituintes Fornalha	Multiciclone; Ventilador de exaustão (7,5 kW); Sistema de Alimentação (1,5 kW); Chaminé; Quadro elétrico de comando e controlo; Silo metálico (10 m <sup>3</sup> ) com extractor hidráulico (7,5 kW) e sem-fim de descarga (1,5 kW);
Potência Fluido térmico (kW)	350
Constituintes Fluido Térmico	Bomba óleo térmico (5,5 kW); Depósito de óleo térmico de 1 500L; Depósito de expansão de 500 L

Os passos para a realização do estudo da substituição da caldeira no *RETscreen* (Tabela 21) foram os seguintes (Tabela 22):

- Seleção e enumeração do tipo de projeto a analisar;

**Tabela 21 - Dados iniciais *RETscreen***

Tipo de projeto	Definido pelo utilizador
Tipo de análise	Método 1 (menos pormenorizado)
Poder calorífico de referência	Poder calorífico Inferior
Idioma	Português
Moeda	Euro
Localização dos dados climatológicos	Coimbra

- Definir tipo de combustível em uso e o tipo de combustível a substituir;
- Definir consumos e custos associados;
- Definir a taxa de inflação associada ao País;
- Definir o tempo de vida do projeto (estudo);

**Tabela 22 - Dados energéticos *RETscreen***

Definido pelo usuário	Energia	
Tipo de combustível	Gás Natural	Biomassa
Consumo de combustível - anual	m <sup>3</sup>	ton
Custo do combustível	€	€
Investimento	-	€
Taxa de Inflação	0,2 % (PORDATA, 2014)	
Vida do projeto	10 Anos	

Os estudos associados aos dois tipos de combustível analisados foram obtidos através da conversão do consumo de gás natural por intermédio das equações (57) e (58), e foram inseridos no *RETscreen* para avaliar as poupanças associadas a cada combustível discriminadamente.

$$\text{Consumo combustível de pellets (ton)} = \text{Consumo Gás Natural (m}^3\text{)} \times 0,0022 \left( \frac{\text{ton pellets}}{\text{m}^3 \text{ Gás Natural}} \right) \quad (57)$$

$$\text{Consumo combustível de estilha (ton)} = \text{Consumo Gás Natural (m}^3\text{)} \times 0,0029 \left( \frac{\text{ton pellets}}{\text{m}^3 \text{ Gás Natural}} \right) \quad (58)$$

---

## CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O presente capítulo visa analisar os valores resultantes dos diversos estudos realizados.

### 5.1 Caracterização Energética da Instalação;

Como foi demonstrado anteriormente (Tabela 1 na secção 3.2), verifica-se que a Prioridade S.A. possui um elevado consumo de recursos energéticos inerente ao processo produtivo, o que causa grande preocupação não só a nível energético e ambiental mas também e, principalmente, a nível económico. Deste modo, uma das principais preocupações da empresa é o elevado consumo de gás natural.

Através dos cálculos apresentados anteriormente, verificou-se que a instalação se enquadra nos termos do regulamento referente ao SGCIE. A instalação consumiu 1186 tep no ano de 2013, encontrando-se, assim, acima do valor estabelecido pelo regulamento de 1000 tep ao ano. A Prioridade, segundo a legislação em vigor, tem a obrigatoriedade de integrar o Decreto-Lei 71/2008, comprometendo-se a atingir o objetivo imposto pela mesma de reduzir 6% ao longo de 6 anos.

Apesar de não estar integrada no Decreto-Lei referenciado, a Prioridade S.A. tem em conta a sua responsabilidade para com a população e para com os compromissos do País, tentando reduzir os consumos energéticos e as consequentes emissões associadas ao seu processo produtivo. A Prioridade S.A. tem investido na área de reciclagem do asfalto antigo para promover a reutilização do material em novos pavimentos, aceitando também material proveniente de outras empresas, reduzindo deste modo os resíduos destinados para aterro e muitas vezes deixados ao abandono. A Prioridade S.A. tem investido também no tratamento e proteção dos agregados e fresado para minimizar os consumos associados ao processo de secagem e sobreaquecimento dos agregados, visando sempre a redução do consumo energético e aumento da performance dos seus produtos, tornando a sua marca confiável, para que os seus produtos sejam uma referência a nível nacional.

Durante a realização do presente trabalho encontraram-se algumas dificuldades na procura de informação relativa ao cilindro exsicador, pois o manual de utilizador encontra-se mal traduzido, com ausência da devida identificação da potência do queimador e alguma confusão relativa a outros dados. Outra dificuldade encontrada foi referente ao *software* que comanda as operações de secagem e sobreaquecimento dos agregados e que contém informação relativa à produção, uma vez que este não oferece qualquer forma de extração dos valores em formato digital, obrigando ao apontamento manual dos dados.

Evidenciou-se que o colaborador que comanda as operações de produção de massas asfálticas no cilindro exsicador tem uma atitude bastante positiva no que concerne à redução de consumos na produção de massas asfálticas, operando o cilindro exsicador de forma a “anular” o consumo de gás natural para aquecer o cilindro. Ou seja, o colaborador produz ainda massas asfálticas após o queimador ser desligado, aproveitando o calor presente no cilindro sem alterar a desempenho do mesmo.

## 5.2 Distribuição dos consumos de gás natural

O objetivo do presente estudo foi de analisar como se distribui o consumo de gás natural da instalação (Tabela 25). Esta tabela pode conter algum erro associado, pois não é representado o consumo de gás natural real: o consumo associado à caldeira de manutenção da temperatura de betume foi estimado, e essa estimativa foi realizada mediante a visualização do acionamento da chama da caldeira. Apesar das estimativas terem sido realizadas a diferentes horas do dia, durante alguns dias, com a caldeira de aquecimento do óleo térmico devidamente coberta, com as tubagens isoladas e, deste modo, com aparente redução de perdas térmicas, os resultados obtidos são suscetíveis de algum grau de incerteza.

As medições energéticas da caldeira de aquecimento de betume foram realizadas de manhã e à tarde, verificando-se que o funcionamento da caldeira se manteve semelhante (Tabela 23).

**Tabela 23 – Medições energéticas realizadas à caldeira de aquecimento térmico**

Medições	Tempo de medição (min)	Ciclo (n.º de arranques-paragens)	Tempo de aquecimento/ciclo	(Tempo de funcionamento Possível) (min/dia)	(Tempo de funcionamento efetivo) (min/dia)	Funcionamento (h/dia)	Consumo de Gás Natural	
							kWh	m <sup>3</sup>
1	10	5	2,00	480	240	4,00	1396,0	<b>117,71</b>
2	10	4	2,50	480	192	4,80	1675,2	<b>141,25</b>
3	10	5	2,00	480	240	4,00	1396,0	<b>117,71</b>
4	10	5	2,00	480	240	4,00	1396,0	<b>117,71</b>
5	10	5	2,00	480	240	4,00	1396,0	<b>117,71</b>
6	10	4	2,50	480	192	4,80	1675,2	<b>141,25</b>
7	10	4	2,50	480	192	4,80	1675,2	<b>141,25</b>

A análise do consumo de gás natural realizada ao cilindro exsicador (Tabela 24) teve por base a visualização do consumo no contador digital da instalação, antes de iniciar a produção e assim que a produção termina (queimador desligado). O consumo associado à caldeira de aquecimento de betume foi subtraído ao consumo total obtido ao final do dia, para determinar qual o consumo associado ao cilindro exsicador.

Como este consumo é influenciado pela caldeira de aquecimento de betume e sendo este estimado, o consumo no cilindro pode sofrer um erro não contabilizável associado.

**Tabela 24 - Funcionamento típico do cilindro exsicador**

Cilindro Exsicador					
Tempo Funcionamento (h)	Arranque	Início (Antes de iniciar a produção) (m <sup>3</sup> )	Fim (Após terminar a produção) (m <sup>3</sup> )	Total (Diferença de consumos) (m <sup>3</sup> )	Produção (ton)
01:26:00	1	4875165,33	4875714,59	549,26	169
00:13:00	2	4875714,59	4875827,95	113,36	28
00:43:00	3	4875827,95	4876052,83	224,90	60
0:27:00	4	4876052,83	4876260,40	207,60	61
00:12:00	5	4876260,40	4876365,30	104,90	27
0:08:00	6	4876365,30	4876457,75	92,50	19

A instalação tem um funcionamento maioritário da parte da manhã, facto que se deve ao horário do início da atividade de aplicação de massas asfálticas. Por norma, neste horário, as temperaturas são mais baixas, e o conteúdo é humidade superior. A Prioridade tenta minimizar o impacto que as condições atmosféricas têm no consumo de gás natural através de coberturas para os agregados e fresado. No entanto, como as coberturas são abertas (lateralmente) e as condições de temperatura e humidade não são controladas, as condições climatéricas acabam por influenciar o consumo de gás natural.

**Tabela 25 - Tabela de funcionamento semanal típico da instalação**

Dia	Horas Funcionamento cilindro exsicador (h)	Gás Natural consumido cilindro exsicador (m <sup>3</sup> )	Horas Funcionamento Caldeira (h)	Gás Natural Caldeira (m <sup>3</sup> )
1	03:42:00	1418,60	4:17:20	126,30
2	03:09:00	1292,40	4:20:00	127,80
3	01:28:58	582,60	4:32:00	133,40
4	1:16:00	481,06	4:00:00	117,71
Média Total	02:23:59	943,70	4:17:20	126,30
% Consumo Gás Natural	-	<b>88,2%</b>	-	<b>12%</b>

Para avaliar efetivamente os consumos dos dois pontos, seria necessário instalar dois contadores, acoplados a cada ponto, de forma a averiguar a distribuição entre ambos os pontos de consumo de gás natural.

A grande questão prende-se com o acondicionamento dos agregados, para que os consumos de gás natural sejam mais baixos. Assim sendo, uma reflexão a ter em conta é se a cobertura total de toda a instalação, desde a trituração do fresado até à descarga, não seria uma mais-valia energética para a empresa.

Através da Tabela 25 verifica-se que o cilindro exsicador tem um consumo aproximado de 90% do total de gás natural e a caldeira de aquecimento de óleo térmico de 10%. A Tabela 26 demonstra a distribuição do custo de gás natural diário associado à produção de massas asfálticas.

Tabela 26 - consumo típico diário da instalação

Instalação	Caldeira		Cilindro exsicador	
	h/dia funcionamento	m <sup>3</sup>	h/dia funcionamento	m <sup>3</sup>
Consumo total (m <sup>3</sup> )	4:20:00	127,8	3:04:00	1164,6
Consumo (%)	10%		90%	
(Custo Ano 2013 (€))	(45 237,04€)		(407 133,35€)	

### 5.3 Estudo de funcionamento do cilindro exsicador (processo descontínuo);

Este estudo tem como principal objetivo a caracterização do processo produtivo através da relação de vários componentes associados à produção de massas asfálticas (Figura 23). Relaciona-se a produção de massas asfálticas, o consumo de gás natural, os arranques efetuados e as horas de funcionamento.

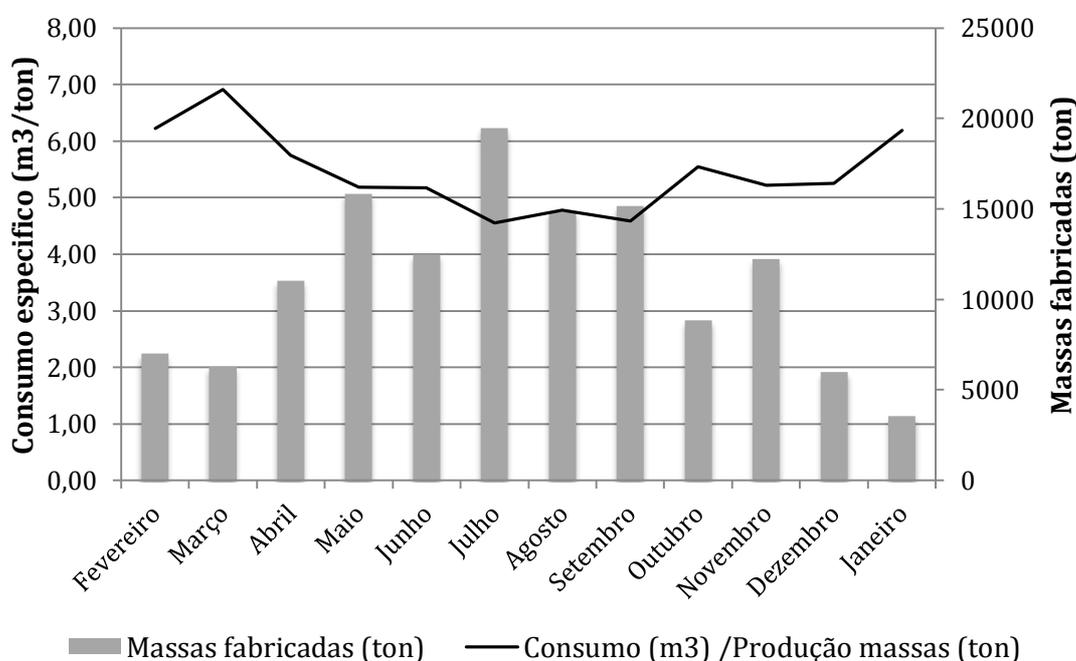


Figura 23 – Consumo Específico vs. Produção de massas fabricadas

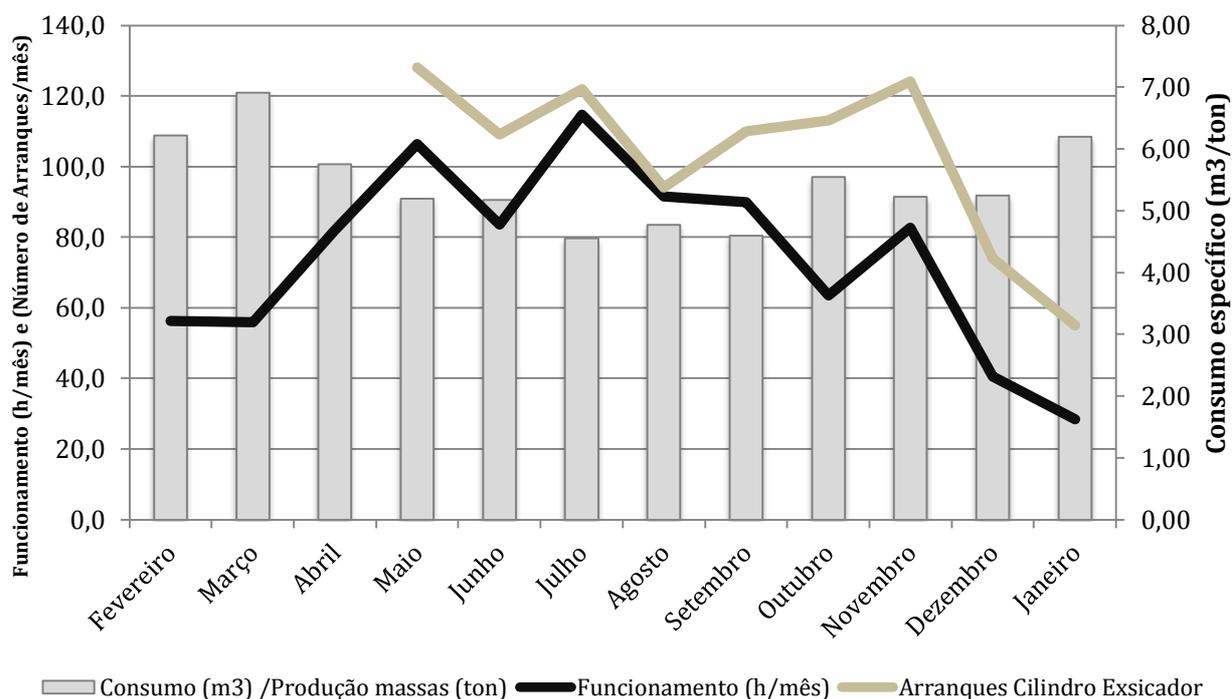
Através da análise da Figura 23, verifica-se que o consumo específico durante o período dos meses de verão (junho, julho, agosto e setembro) é mais baixo. Ou seja, mostra que por cada tonelada de massas asfálticas produzida, se consumiram, neste período, menos recursos energéticos (gás natural). Salienta-se que nos meses em questão as condições climatéricas são mais favoráveis à produção e aplicação de massas asfálticas, pois as temperaturas são superiores, levando a que a necessidade energética para elevar a temperatura do agregado e fresado diminua, com maior tempo de produção e menos arranques.

A necessidade energética mais reduzida deve-se ao facto dos agregados e fresado possuírem um calor específico superior ao que possuem nos meses de inverno, devido às temperaturas mais elevadas. Também o conteúdo em humidade é inferior.

Ao nível do cilindro exsicador, a energia necessária para elevar a temperatura assim que o cilindro inicia a atividade é mais baixa, pois durante os meses de verão este também se encontra a uma temperatura superior.

Nos meses de inverno verifica-se que existe uma necessidade de concentrar a produção, minimizando os arranques e aumentando o tempo de produção, com o objetivo de reduzir a necessidade energética dos arranques.

Pode verificar-se também que a diferença entre o número de horas de funcionamento e os arranques do cilindro exsicador (Figura 24) é mais reduzida quando os consumos específicos são mais baixos, o que indica uma redução no consumo energético quando a produção se realiza continuamente (número de horas consecutivas).



**Figura 24 - Funcionamento vs. Arranques vs. Consumo Específico**

#### 5.4 *Análise aos calores específicos dos agregados que compõem as misturas de massas asfálticas via DSC;*

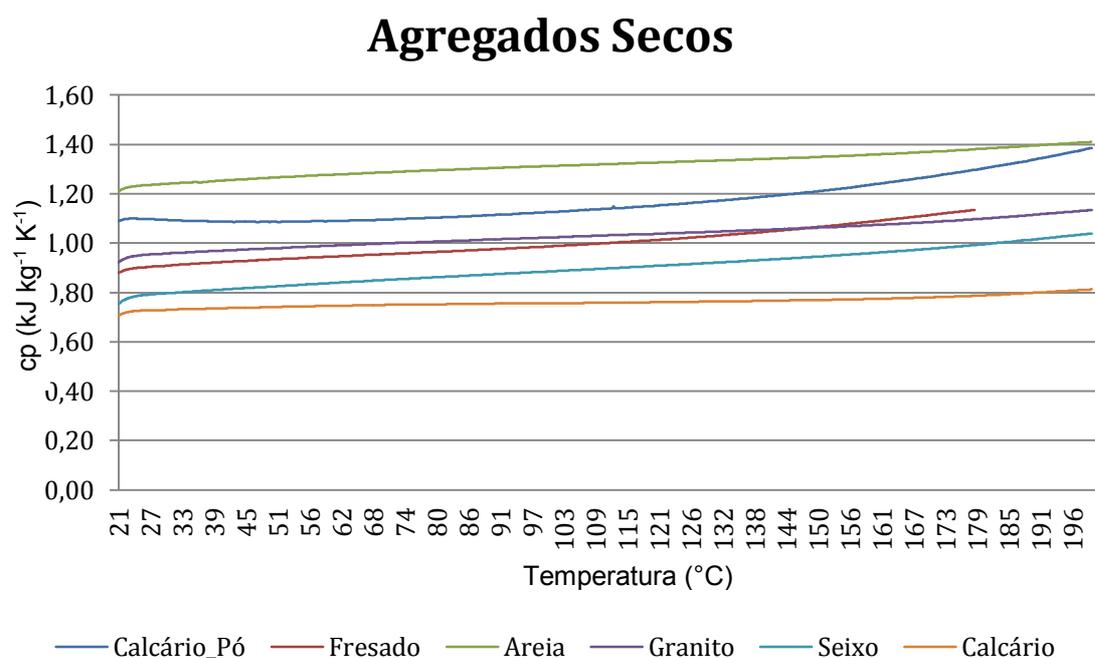
A determinação dos calores específicos é fundamental para entender e quantificar os consumos energéticos associados aos materiais secos e saturados. O seu conhecimento permite quantificar o consumo energético em função da temperatura, tanto para secar totalmente os materiais, como para aquecer os materiais. Estas medições não têm em conta o real funcionamento do cilindro, ou seja, não representam a rotação e as condições de pressão.

As medições realizadas no *DSC* foram extremamente importantes, não só na medida em que permitiram entender o comportamento dos agregados ao sofrerem o processo de aquecimento e de perda de humidade, mas também para se conseguir quantificar as variações de  $c_p$  associadas a cada componente individualizado.

Através da Figura 25 verifica-se que o componente que necessita de maior energia para elevar a sua temperatura é a areia, e o que necessita de menos energia é o calcário.

Admite-se que a composição, o local de extração, o método de análise e o manuseamento e manipulação da amostra podem influenciar os valores de  $c_p$  determinados, porque, quando comparados com os valores obtidos na literatura, verifica-se uma variação de valores.

Na presente análise (Figura 25), o calor específico associado a cada componente é crescente ao longo da análise, não existindo nenhuma mudança de fase, nem variações da inclinação da curva, o que se justifica pelo facto dos materiais se encontrarem completamente secos.



**Figura 25 – Determinação calor específico (via seca)**

As equações apresentadas na Tabela 27, foram obtidas por intermédio das opções fornecidas pelos gráficos do *Excel*, onde o  $T$  é referente à temperatura final pretendida pela mistura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

**Tabela 27 - Equações obtidas através da Figura 25**

Componente	$cp = cp(T)$ ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	Correlação, $R^2$ (-)
Pó Calcário	$cp = 9 \times 10^{-8} T^2 - 6 \times 10^{-5} T + 1,099$	0,998
Fresado	$cp = 3 \times 10^{-5} T^2 + 5 \times 10^{-5} T + 0,907$	0,994
Granito	$cp = 7 \times 10^{-9} T^2 + 6 \times 10^{-5} T + 0,954$	0,990
Areia	$cp = 8 \times 10^{-0,5} T + 1,237$	0,990
Seixo	$cp = 1 \times 10^{-8} T^2 + 9 \times 10^{-5} T + 0,790$	0,995
Calcário	$cp = 7 \times 10^{-9} T^2 + 2 \times 10^{-5} T + 0,732$	0,947

### 5.5 *Análise aos calores específicos dos agregados que compõem as misturas de massas asfálticas via DSC;*

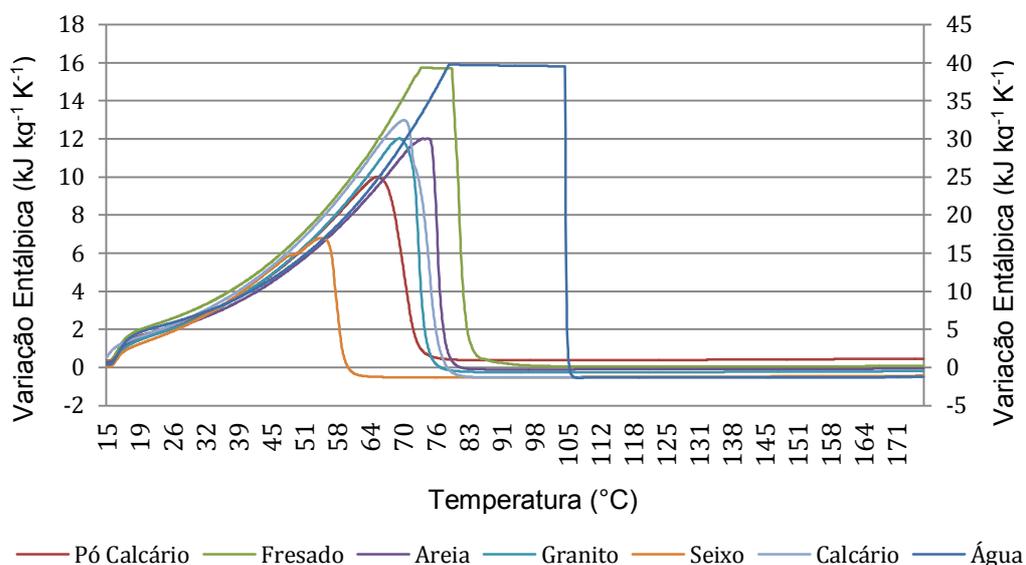
A Figura 26<sup>4</sup> demonstra o comportamento dos agregados e fresado saturado. Pela observação do comportamento das curvas, verifica-se um rápido aumento da necessidade energética em concordância com a temperatura. O rápido crescimento da variação entálpica está associado à libertação da água presente nos agregados.

Ao crescimento exponencial observado nas curvas da Figura 26, está associada a remoção de humidade que se encontra à superfície do agregado (água livre). Posteriormente, observa-se um aumento do consumo de energia em concordância com uma ligeira estabilização dos valores de temperatura, indicando a dificuldade de remoção da humidade dos agregados. O que se poderá dever à necessidade energética associada à remoção da água que está presente nos espaços intersticiais do agregado (água ligada).

Pela estabilização da curva, assume-se que a água presente nos materiais foi totalmente removida e se encontra totalmente vaporizada. Através da redução abrupta da curva, conclui-se que toda a água é evaporada dos materiais e do *DSC*.

<sup>4</sup> A denominação de “*variação entálpica*” representa a variação de energia associada tanto ao aquecimento do material saturado, como a mudança de fase que ocorre no mesmo.

## Materiais Saturados + Água



**Figura 26 - Determinação de calor específico (via húmida)**

Ao comparar as curvas mostradas na Figura 26, dos materiais obtidos com o da água, verifica-se que as curvas obtidas se apresentam idênticas, com amplitudes diferentes, o que confirma a remoção da totalidade da água presente nos materiais. As diferenças ocorridas podem ser explicadas pela quantidade de água presente nas amostras analisadas, e a diferença entre a constituição das mesmas nos cadinhos.

Não é possível quantificar a perda de água associada a diversos instantes durante a medição de  $c_p$ , pois é inviável interromper as análises ao longo do processo.

É de salientar a importância da presença de água na influência do consumo energético: verifica-se que a necessidade energética para aquecer os materiais é bastante inferior quando se secam os mesmos.

O presente estudo é vital não só se conhecer os calores específicos dos materiais, mas também para verificar como se comportam durante a extração da água, isto é, possibilita identificar quais os componentes que mais facilmente libertam a humidade e quais os componentes que necessitam de maior quantidade de energia.

Ao nível energético, como se verifica pelas figuras apresentados, para reduzir o tempo de secagem, devem-se introduzir no cilindro exsicador primeiramente os agregados que têm menor capacidade de libertação de água e, posteriormente, os que possuem maior capacidade, podendo ser um passo importante na otimização da produção. Neste caso concreto, quando totalmente saturados, a ordem de entrada dos agregados seria: areia, calcário, granito, pó calcário e seixo.

Através da visualização do Figura 26, verifica-se a hierarquia de preocupação de acondicionamento, ou seja, os materiais que necessitam de maior cuidado são os que tendem a necessitar de mais energia para libertar a humidade que possuem.

Com o objetivo de conceber um modelo térmico, é importante utilizar as equações (Tabela 27) associadas às curvas obtidas (Figura 25), representativas do calor

específico associado a cada material seco ao longo da amplitude térmica praticada na instalação, com o objetivo de integrar no modelo térmico.

Após a realização do presente estudo, verificou-se que existe uma necessidade de aprofundar a questão da medição dos diferentes compostos associados às massas asfálticas devido às suas diferentes constituições, necessidades energéticas, facilidade/dificuldade de remoção do conteúdo em humidade. Um estudo importante a ser tratado com aprofundamento seria de averiguar, com precisão, se as curvas obtidas após a secagem do material se identificam com as curvas dos materiais já secos, verificando a existência de continuidade da curva e tendo como finalidade demonstrar a existência de uma possível homogeneidade nas amostras analisadas, com constituições idênticas.

### **5.6 Realização de um modelo térmico teórico com utilização do Balanço mássico e energético ao cilindro exsicador**

A presente subsecção tem por objetivo demonstrar o comportamento económico e energético da instalação no processo de secagem e sobreaquecimento dos agregados com inclusão de material fresado a frio.

Recorrendo ao balanço mássico e balanço energético, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 28.

A gama de temperaturas limite de referência, enumerada pela Prioridade, situa-se entre os 240°C e 245°C. O aumento da temperatura, acima dos valores anteriormente enumerados, influencia não só os consumos energéticos, mas também, e principalmente, representa um perigo para a instalação, por ultrapassar em demasia a temperatura de inflamação do betume.

A determinação da seleção da temperatura final da mistura tem interesse quer numa ótica de eficiência energética, revelando-se um ponto extremamente importante, quer também pela influência que exerce na qualidade do produto final e na sua posterior aplicação.

A temperatura da mistura final é influenciada pela distância que os transportadores têm de percorrer até à aplicação de massas asfálticas, ou seja, se a aplicação for próxima da central não se irá necessitar de uma temperatura de mistura tão elevada como no caso de a aplicação acontecer a uma distância superior.

A determinação da previsão de temperatura de utilização no cilindro exsicador para secar e sobreaquecer os agregados pode contribuir para uma redução dos custos energéticos, na medida em que se pode determinar a temperatura ótima de utilização do cilindro exsicador, para que a qualidade do produto final e da sua aplicação não seja mais que a necessária, e evitando um aquecimento insuficiente que comprometa a qualidade da aplicação das massas asfálticas.

Desde já é importante referir que um ponto de estudo com interesse, é o das perdas térmicas associadas ao transporte das massas asfálticas. Apesar do transporte estar coberto por uma lona, esta não cobre na totalidade o semirreboque. Por sua vez, o semirreboque é constituído por ferro sem qualquer isolamento exterior, e com a movimentação do camião o arrefecimento poderá ser mais rápido.

Observou-se a instalação em funcionamento e verificou-se que as temperaturas de operação se situam entre os 220 °C e os 245 °C, para se conseguir uma temperatura

das misturas entre os 165 °C e os 185 °C sensivelmente, mediante a distância a que ocorre a aplicação.

Foram realizadas várias simulações com o modelo térmico, estando os resultados obtidos apresentados na Tabela 28 e na Tabela 30.

**Tabela 28 – Exemplo de misturas e previsões de consumos para produção de massas asfálticas (100 ton.) com humidade determinada em laboratório**

Modelação			Temperatura Mistura (Seleção)	Energia – (Gás Natural) $T_{\text{agregados}}=25^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Fresado}}=25^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{ar seco}}=25^{\circ}\text{C}$				Energia – (Gás Natural) $T_{\text{agregados}}=15^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Fresado}}=15^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{ar seco}}=15^{\circ}\text{C}$						
Misturas	Denominação	Constituição		Produção horária (ton/h)	$T_{\text{cilindro Exsicador}}$ (Previsão)	Consumo	Custo GN	Energia	Custo Produção	$T_{\text{cilindro Exsicador}}$ (Previsão)	Consumo	Custo GN	Energia	Custo Produção
				(°C)	(°C)	(m <sup>3</sup> )	(€)	(GJ)	(€)	(°C)	(m <sup>3</sup> )	(€)	(GJ)	(€)
1	Calcário pó 0/4	44%	88,7	170	200	254,8	245,7	24,5	2 735,5	201	284,6	284,6	27,9	2 774,4
	Calcário	46%												
	Fresado	10%												
2	Calcário pó 0/4	39%		170	198	288,3	276,7	28,3	2 849,1	199	321,9	320,5	31,6	2 892,9
	Granito	51%												
	Fresado	10%												
3	Calcário pó 0/4	44%		170	199	244,2	235,0	23,9	2 789,2	201	273,6	273,2	26,8	2 827,4
	Seixo	46%												
	Fresado	10%												
4	Calcário pó 0/4	30%		170	228	258	263,5	25,3	2 765,1	231	285,6	303,7	27,8	2 805,3
	Seixo	25%												
	Granito	25%												
	Fresado	20%												
5	Calcário pó 0/4	30%		170	224	276,8	280,4	27,1	2 751,5	227	306,9	323,4	30	2 794,6
	Seixo	15%												
	Granito	15%												
	Areia	20%												
	Fresado	20%												

Continuação da Tabela 28 – Exemplo de misturas e previsões de consumos para produção de massas asfálticas (100 ton.) com humidade determinada em laboratório

Modelação			Temperatura Mistura (Seleção) (°C)	Energia – (Gás Natural) $T_{\text{agregados}}=25^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Fresado}}=25^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{ar seco}}=25^{\circ}\text{C}$					Energia – (Gás Natural) $T_{\text{agregados}}=15^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Fresado}}=15^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{ar seco}}=15^{\circ}\text{C}$				
Misturas	Denominação	Constituição Produção horária (ton/h)		$T_{\text{Cilindro Exsicador}}$ (Previsão)	Consumo	Custo GN	Energia	Custo Produção	$T_{\text{Cilindro Exsicador}}$ (Previsão)	Consumo	Custo GN	Energia	Custo Produção
				(°C)	(m <sup>3</sup> )	(€)	(GJ)	(€)	(°C)	(m <sup>3</sup> )	(€)	(GJ)	(€)
6	Calcário pó 0/4	25%	170	244	273,5	288,2	26,8	2 766,7	<b>248</b>	301,6	331,3	29,5	2 809,9
	Granito	20%											
	Areia	15%											
	Seixo	15%											
	Fresado	25%											
7	Calcário pó 0/4	25%	170	240	291,7	304,9	28,6	2 737,8	244	321,9	350,6	31,6	2 783,5
	Areia	25%											
	Granito	25%											
	Fresado	25%											
8	Calcário pó 0/4	23%	<b>158</b>	<b>245</b>	275,9	291,1	27	2 734,2	<b>250</b>	305	336,2	29,9	2 779,3
	Areia	23%											
	Granito	24%											
	Fresado	30%											

Foram utilizadas diferentes misturas de agregados, compostas por diferentes tipos de agregados com inclusão de material reciclado a frio.

Para obter um termo de comparação foi estabelecida uma produção total de massas asfálticas de 100 ton h<sup>-1</sup>. Assim sendo, a totalidade de agregados no cilindro exsicador objeto de modelação foi de 88,7 ton h<sup>-1</sup>. Para a produção das massas asfálticas referidas e, segundo as condições operatórias referidas no manual do operador, o tempo de secagem e sobreaquecimento para a produção das massas asfálticas será de sensivelmente 33 minutos.

De igual forma, e de acordo com as condições impostas, os resultados obtidos foram diferenciados em duas temperaturas, para avaliar o comportamento energético mediante diferentes amplitudes térmicas.

Para obter os valores da Tabela 28, os teores de humidade utilizados foram os determinados em laboratório (Tabela 29).

**Tabela 29 – Resultados obtidos da humidade determinada em laboratório**

% Humidade						
Material	Calcário Pó 0/4	Fresado	Areia	Granito	Seixo	Calcário
% Humidade	0,091%	0,26%	1,13%	1,72%	0,44%	1,44%

Pelos valores obtidos da Tabela 28 verifica-se que, para uma temperatura de mistura de 170 °C, existem diferentes requisitos energéticos de secagem e de sobreaquecimento dos agregados.

Verifica-se ainda que existem diferenças na temperatura de aquecimento e consequente consumo energético de acordo com as diferentes composições de misturas.

As principais influências verificadas no consumo energético obtidas através da modelação foram: a composição da mistura (necessidade energética dos agregados individualmente) e o conteúdo em humidade que cada agregado apresenta (a necessidade de aquecimento da água até à ebulição e posterior evaporação). Acrescenta-se ainda a influência do conteúdo em humidade que o fresado apresenta, pois é determinante para obter a temperatura a que se têm de elevar os agregados para os conseguir secar e aquecer, atingindo o equilíbrio térmico pretendido.

Pela Tabela 28, constata-se também que as temperaturas divergem mais quando a inclusão de fresado aumenta, existindo uma redução da utilização dos agregados a incorporar no cilindro exsicador. Consequentemente a necessidade energética aumenta devido ao aumento da quantidade de fresado, que terá de sofrer o processo de secagem e aquecimento por contacto direto com os agregados secos e sobreaquecidos.

A Tabela 28 pretende demonstrar como se comporta o cilindro energeticamente, de acordo com a bibliografia estudada. Assim sendo, e estando de acordo com o tipo de instalação, produção de massas asfálticas com incorporação de reciclado a frio, os valores de incorporação de fresado estão compreendidos entre 10% e 30%.

A constatação enumerada no parágrafo anterior, pode ser consumada mediante algumas especificações, tais como: o tipo de constituintes utilizado nas misturas, a humidade presente nos constituintes, a temperatura a que os agregados possam ser elevados e qual a temperatura do equilíbrio térmico (temperatura final da mistura).

---

Na Tabela 28, para uma inclusão de 30% de material fresado, foi selecionada uma temperatura de equilíbrio térmico de 158 °C, para que os agregados sejam aquecidos a 245°C (máximo imposto), com uma temperatura inicial de agregados e fresado de 25°C. Se apresentarem uma temperatura inicial inferior à temperatura anteriormente utilizada, a temperatura de aquecimento terá de ser mais elevada, ou a temperatura final de mistura terá de ser mais baixa.

De acordo com o caso apresentado, se os agregados e fresado apresentarem uma temperatura inicial de 15°C e a temperatura de mistura se mantiver igual, o aquecimento dos agregados teria de ser de 250 °C, ultrapassando em 5°C o limite estipulado.

Os valores obtidos na Tabela 30 representam a crescente necessidade energética associada ao aumento da humidade presente nos materiais. Nos resultados apresentados foi utilizada a mesma humidade em todos os materiais e a mesma mistura.

Para que se pudesse realizar uma comparação utilizou-se uma temperatura de mistura fixa de 170°C.

Com a mistura apresentada na Tabela 30 observa-se que nos materiais com 0% de humidade e com temperatura inicial fixa nos 25°C o consumo energético determinado foi de 25,8 GJ. Este valor é referente a uma produção sem qualquer quantidade de humidade e, deste modo, o consumo está apenas associado ao sobreaquecimento dos agregados. Para uma temperatura inicial de 15°C o consumo energético aumentou para os 28,8 GJ.

Quando se comparam os valores anteriormente determinados com os valores obtidos quando estes apresentam um conteúdo em humidade de 5%, observa-se que a necessidade energética sofre um elevado crescimento, ou seja, para uma temperatura inicial de 25 °C os materiais necessitam de 44,1 GJ e quando apresentam uma temperatura inicial de 15 °C a necessidade energética é de 48,1 GJ.

A presente tabela confirma a extrema importância do conteúdo em humidade presente nos materiais e que a sua redução a montante do processo pode originar poupanças energéticas consideráveis.

**Tabela 30 - Exemplo de previsões de consumos para produção de massas asfálticas (100 ton.) com diferentes teores de humidade**

Mistura	Constituição	Produção horária (ton/h)	Humidade <sup>5</sup> (%)	Temperatura Mistura (Seleção) (°C)	Energia – (Gás Natural) T <sub>agregados</sub> =25°C, T <sub>Fresado</sub> =25°C, T <sub>ar seco</sub> =25°C					Energia – Gás Natural T <sub>agregados</sub> =15°C, T <sub>Fresado</sub> =15°C, T <sub>ar seco</sub> =15°C				
					T <sub>Cilindro Exsicador (Previsão)</sub>	Consumo	Custo	Energia	Custo Produção	T <sub>Cilindro Exsicador (Previsão)</sub>	Consumo	Custo	Energia	Custo Produção
					(°C)	(m <sup>3</sup> )	(€)	(GJ)	(€)	(°C)	(m <sup>3</sup> )	(€)	(GJ)	(€)
Calcário pó	40	88,7	0	170	207	262,9	257,1	25,8	2 753,7	209	294,3	298,8	28,8	2 795,4
			1	170	212	301,5	298,1	29,6	2 794,7	214	334,9	343,9	32,8	2 840,5
Calcário	45		2	170	218	339,4	339,3	33,3	2 835,9	220	374,9	389,2	36,7	2 885,8
			3	170	223	376,8	380,8	36,9	2 877,4	225	414,1	434,8	40,1	2 931,3
Fresado	15		4	170	228	413,7	422,6	40,1	2 919,2	230	452,8	480,5	44,4	2 977,1
			5	170	234	450,1	464,7	44,1	2 961,3	236	490,9	526,6	48,1	3 023,2

<sup>5</sup> A seleção dos diferentes conteúdos em humidade (%), foi referente a uma gama de valores que conseguisse representar uma aproximação dos valores determinados pela Prioridade S.A.

O modelo realizado permite obter dados mais específicos ao nível dos consumos mássicos e energéticos, como se demonstra através das Figuras 27, 28 e 29.

Através da mistura e constituição selecionada na Figura 27, verifica-se que o cilindro exsicador vai realizar uma produção de 100 toneladas de massas asfálticas em 33 minutos, consumindo 254,9 m<sup>3</sup> (404,8 Nm<sup>3</sup>), representando um custo de 245,8 € de gás natural. Através da Figura 28 mostram-se as quantidades mássicas associadas à entrada de agregados e humidade, as quantidades mássicas de gás natural e ar seco necessário à combustão, e as quantidades de saída dos produtos advindos do processo de secagem da combustão do gás natural (GEE e agregados secos e sobreaquecidos). Deste modo, para a produção referida, o consumo de gás natural obtido foi de 547,41 kg h<sup>-1</sup> e de ar seco de 64486,5 kg h<sup>-1</sup>, representando um excesso de ar de 662,3%. Na Figura 29 está representado o consumo energético associado à necessidade energética referente aos materiais e ao queimador do cilindro exsicador, como também as perdas energéticas e as energias associadas à emissão dos gases provenientes do processo de combustão.

Para a produção referida acima, verifica-se que para a secagem e sobreaquecimento dos agregados apresentados são necessários 14,3 GJ h<sup>-1</sup>, sendo fornecidos 24,9 GJ h<sup>-1</sup> de forma a suprir as exigências energéticas referentes ao queimador do cilindro exsicador. Os valores das perdas por convecção, condução e ineficiências de processo associadas atingem os 10,2 GJ h<sup>-1</sup>.

Através do presente processo verifica-se que existe uma divergência na temperatura de emissão de gases de exaustão obtida, quando comparada com os valores fornecidos pela Prioridade S.A. (Tabela 9). Esta diferença pode ter origem na adequação da fórmula à instalação e/ou ineficiências de processo. Assim sendo, em trabalhos futuros, faria sentido efetuar uma análise detalhada à instalação com o objetivo de obter um modelo que descreva as temperaturas de emissão.

Através do modelo térmico realizado, verifica-se que algumas misturas, segundo as limitações impostas anteriormente, só devem ser realizadas durante o Verão, pois a temperaturas ambientes mais baixas não se conseguem atingir as temperaturas pretendidas.

O modelo representa, em parte, o comportamento do cilindro exsicador, demonstrando que a variação da humidade dos agregados e fresado, em associação com a temperatura de entrada dos mesmos, influencia em grande escala o consumo de gás natural.

De acordo com o referido poderá ser avaliado em trabalhos posteriores, a possibilidade de cobrir toda a área, desde a receção de matérias-primas até à descarga das massas asfálticas já produzidas, evitando alterações de temperatura e humidade dos agregados. Deste modo, tendo controlo de todos os componentes que constituem o processo produtivo, é possível tentar aproveitar o calor proveniente das perdas por convecção, radiação e condução do cilindro, e promover a recirculação do calor nos agregados e reciclado, a montante da sua utilização.

Uma das comparações realizadas entre o modelo térmico realizado e o os valores do funcionamento real da instalação, foi de tentar obter os valores concordantes de tempo de funcionamento, e consumo de gás natural de acordo com a Tabela 24 (Arranque 1). Aqui, tentou verificar-se como se obtêm o tempo de funcionamento, o consumo de gás

---

natural e as toneladas produzidas através do modelo. O seu principal objetivo era de fornecer informações relativas à reprodutibilidade dos dados do modelo, assumindo a constituição das massas asfálticas selecionadas como as da Figura 27.

O resultado obtido foi de 1h 11min para o tempo de funcionamento e 542,3 m<sup>3</sup> para o consumo de gás natural, alterando as condições de operação do cilindro, ao nível da capacidade utilizada (1700 kg), tempo de mistura (45 s) e produção horária (75 ton h<sup>-1</sup>). Com esta modelação, realça-se a necessidade de se aferir o modelo ao atual estado da instalação e demonstra-se também a capacidade de adaptar o modelo a outras instalações de produção de massas asfálticas a quente com incorporação de reciclado a frio.

	Entrada
	Salda
	Perdas
	Valores a inserir

Agregados - Determinação Laboratório				
	CP(kj/kg/K) (Para temperatura de aquecimento)	Humidades LABORATÓRIO	Custo (€/ton)	Relação
Calcario pó	1,092	0,096%	1,85 €	-
Granito	0,965	1,72%	6,50 €	-
Calcario	0,736	1,44%	3,35 €	-
Areia	1,251	1,13%	4,50 €	-
Seixo	0,806	0,44%	6,20 €	-
-	-	-	-	-
Filer	-	-	- €	3%
Betume Novo	-	-	470,00 €	50 kg betume/ 1000 kg de massas produzidas
Fresado Frio	0,913	0,26%	4,90 €	-
Água	5,824	-	-	-

Composição misturas				
Quantidade				Consumo m <sup>3</sup> /ton produzidas
Produção Total diária (Húmido)	100	ton		2,55
Produção Horária	88,7	ton/h		Consumo Nm <sup>3</sup> /ton produzida
Custo (€/Nm <sup>3</sup> )	0,607			4,05

Seleção de Misturas	Componente		Custo (€/ton)	Tempo de Funcionamento cilindro
<input checked="" type="checkbox"/>	Calcario pó	44%	1,85 €	33,3 min
<input checked="" type="checkbox"/>	Calcario	46%	3,35 €	
<input type="checkbox"/>	Areia	30%	4,50 €	
<input type="checkbox"/>	Seixo	30%	6,20 €	
	Fresado Frio	10%	4,90 €	
	Filer	2,66 ton	- €	
	Betume novo	5,00 ton	470,00 €	
		100%		

Processo Especificações			
Temperatura de entrada Agregados	25	°C	
Temperatura de entrada Gás Natural	25	°C	
Temperatura de operação cilindro	200	°C	
Temperatura Requerida para Equilíbrio térmico (Agregados+Fresado)	170	°C	
Temperatura do Fresado	25	°C	

Custo de Produção	Consumo m <sup>3</sup>	Consumo Nm <sup>3</sup>	Custo Gás Natural
2 735,59 €	254,94	404,83	245,80 €

Figura 27 - Exemplo de modelação de uma mistura

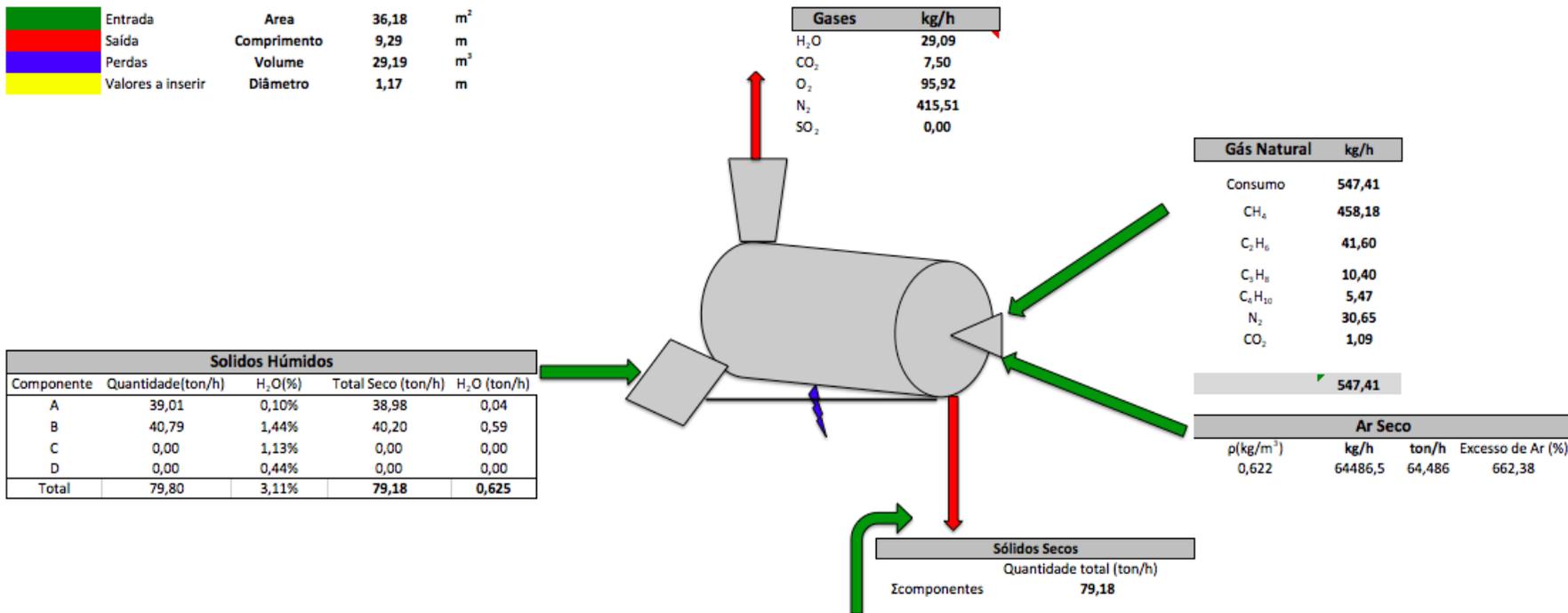


Figura 28 - Exemplo de modelação para a massa

■ Entrada  
■ Saída  
■ Perdas  
■ Valores a inserir

Qebulição	Qevaporação
CPv (kJ/kg.k)	ΔHw=lv (kJ/kg)
5,824	2440

Qsólido					Total Sólidos (Mj/h)
Componente	cp (kJ/kg.k)	Tin (°C)	Toperação (°C)	Total (kJ)	
A	1,092	25	200	7455806,37	14342,40
B	0,736	25	200	5181976,88	
C	1,251	25	200	0,00	
D	0,806	25	200	0,00	

Qágua				
Componente	Tin (°C)	Tgases (°C)	Qebulição (kJ)	Qevaporação (kJ)
H <sub>2</sub> O	25	74,51	180146,85	1524465,152

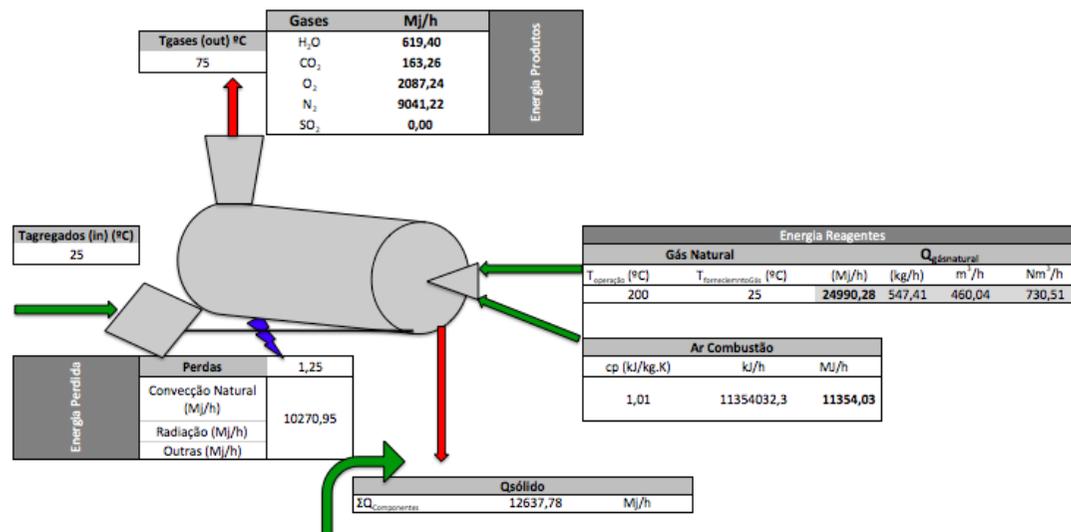


Figura 29 - Exemplo de modelação para a energia

### 5.7 Estudo da viabilidade de substituição da caldeira de aquecimento de óleo térmico

A Tabela 31 resulta do estudo realizado referente à caldeira de manutenção da temperatura do betume a 170 °C.

Através do presente estudo verifica-se que existe uma redução de custos quando se altera o combustível de gás natural para biomassa. De entre os combustíveis analisados (assumindo o mesmo rendimento para ambos), o consumo de estilha é mais favorável que o consumo de *pellet*, tendo em conta a economia que apresenta.

O consumo de combustível ao nível dos *pellets* apresenta-se inferior ao da estilha, mas como referido anteriormente o custo de aquisição da estilha é inferior. Os valores utilizados para determinação do custo associado ao consumo foram fornecidos pela empresa de produção de caldeiras contactada, e como tal, o custo dos *pellet* é influenciado pelos fornecedores de combustíveis.

O retorno do investimento analisado tem em conta apenas os valores que se obtêm na redução do custo ao alterar os consumos energéticos. Não tem em conta outros fatores, tais como a degradação da caldeira, que vai alterando o seu próprio rendimento, nem custos com a manutenção a realizar.

Como se verifica na Tabela 31 o retorno de investimento é mais rápido se o combustível for a estilha (5,2 anos) do que se for a *pellet* (6,5 anos).

**Tabela 31 - Resumo resultados**

Resumo do estudo efetuado			
Combustível	Gás Natural	<i>Pellet</i>	Estilha
Potência		350 kW	
Equivalência utilizadas (ROCA, 2008)	1 m <sup>3</sup>	0,0022 ton	0,0029 ton
Consumo	76948,2 m <sup>3</sup>	169,3 ton	233,2 ton
Custo	0,607 € m <sup>-3</sup>	140 € ton <sup>-1</sup>	80 € ton <sup>-1</sup>
Custo Combustível (€ ano <sup>-1</sup> )	<b>46 707,6</b>	<b>23 700,1</b>	<b>17 851,9</b>
Poupança (€ ano <sup>-1</sup> )	-	23 007,5	28 855,6
Produção cinzas (ton)	-	1,69	2,23
Investimento (€)		± 150 000	
Retorno (anos)	-	6,5	5,2
TIR (%)	-	8,9	14,3
Emissão de GEE (tonCO <sub>2</sub> )	186,9	-	-

Constata-se através do presente estudo que a alteração da caldeira pode reforçar não só o compromisso da instalação para com as metas referentes à redução das emissões de GEE, como também, e em consequência, reduzir a dependência económica e energética.

As cinzas provenientes da combustão da biomassa podem constituir um problema, mesmo que em quantidades reduzidas, pois têm de sofrer um tratamento adequado, segundo a legislação de resíduos (Portaria n.º 209/2004, de 3 de março, alterada pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de

---

junho). Os tratamentos mais usuais relativamente às cinzas são: a sua utilização como fertilizante, como agente de correção de solos, a sua incorporação na produção de cimento ou o envio para aterro.

O envio para aterros é o menos atrativo para a instalação, pois tem um custo associado ao seu depósito ( $\pm 60$  €/ton dependendo dos aterros)<sup>6</sup>.

Outro destino possível, mais de acordo com a instalação em questão, é a possibilidade de inclusão das cinzas provenientes da combustão da biomassa no processo produtivo de massas asfálticas.

Segundo Xue *et al.* (2014), a incorporação de até 20% de cinzas do total de *filler* a incorporar na produção de massas asfálticas pode melhorar a performance, melhorando as propriedades físicas do ligante asfáltico, protegendo as massas asfálticas contra a rutura.

Segundo o estudo realizado e de acordo com os mesmos autores, pode referir-se que existe uma área de estudo interessante de forma a averiguar se efetivamente a introdução de cinzas proveniente do processo de combustão de biomassa pode (ou não) influenciar positivamente a performance das massas asfálticas.

No entanto, o tempo de retorno do investimento não se demonstrou atrativo para a empresa, inviabilizando a aplicação da hipótese acima referida.

---

<sup>6</sup> valor representativo encontrado em duas entidades de tratamento de resíduos, a *valorambiente* e a *valorsul*

## **CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS**

A principal conclusão do presente trabalho relaciona-se com a influência do estado dos agregados e do fresado no processo produtivo de secagem e no sobreaquecimento dos agregados para posterior inclusão de material reciclado. O clima tem influência ao nível das características do próprio material e do processo produtivo. A amplitude térmica que os agregados sofrem na secagem e sobreaquecimento, e a humidade que os materiais possam apresentar, vão influenciar o consumo energético.

Outra característica que influencia o consumo energético é o calor específico associado a cada componente, dado que cada material necessita de diferentes quantidades energéticas para alcançar uma temperatura final. Porém, a principal causa, como se verificou durante a realização do trabalho, é a necessidade energética requerida para remover a água contida nos agregados. Verificou-se, através do estudo realizado, que a necessidade energética de aquecimento do agregado seco foi menor no calcário e maior na areia. Pela análise dos agregados húmidos, verificou-se que existe uma maior facilidade na remoção da humidade do seixo e menor no fresado.

As análises realizadas em laboratório demonstraram que as características intrínsecas dos materiais influenciam o processo de secagem e que os diferentes materiais necessitam de diferentes quantidades de energia não só no aquecimento dos agregados, mas também no processo de remoção de água de cada material individualmente.

Esta análise foi necessária a fim de conhecer o percurso que cada material realiza no processo de secagem. Visualiza-se deste modo, como é feita a extração da humidade ao longo do aquecimento. Conclui-se ainda que cada material é constituído por diferentes compostos, influenciando as suas propriedades, como, por exemplo, a porosidade, a rigidez, a capacidade de retenção e remoção de água.

As equações obtidas através dos gráficos dos calores específicos a seco permitem integrar no modelo o comportamento térmico dos materiais, de forma a avaliar o calor específico efetivo, associado à temperatura que se terá na mistura final, permitindo um valor mais próximo da realidade e, deste modo, obter um valor de consumo energético final das misturas também mais próximo da realidade.

Para além do referido, existem algumas ações que devem ser tomadas, tais como a inserção da empresa no SGCIE, podendo deste modo tirar partido do sistema, como por exemplo, angariando fundos para investimentos que reduzam os consumos energéticos. Conforme o aludido, o gás natural representa efetivamente uma preocupação a nível económico e energético, pois a redução do seu consumo gera um aumento nas margens operacionais da unidade de produção. O modelo tenta prever o consumo energético associado às diferentes temperaturas e conteúdos em humidade que os materiais possam apresentar com a inclusão do material reciclado a frio. Conclui-se que a percentagem de inclusão do fresado a frio é determinado pelo conteúdo em humidade e temperatura inicial que apresenta.

---

Outro ponto a avaliar, numa outra oportunidade, é o elevado consumo referente ao gásóleo, pois representa uma elevada percentagem na fatura a pagar, devendo ser avaliada a possibilidade de o reduzir.

Existiram algumas dificuldades ao nível de interpretação do processo produtivo e dos componentes que da instalação, pois o manual de instruções do operador possui alguns erros (má tradução do italiano) e alguns dados não estão devidamente identificados. Também se verificaram algumas dificuldades na transposição da informação analisada através da bibliografia para o caso prático específico. Existiu um contratempo na análise das perdas térmicas oriundas do processo produtivo, pois o equipamento (Câmara Termográfica) sofreu uma avaria e, como tal, não se conseguiu confirmar as suspeitas ao nível das perdas do calor por convecção e radiação.

Ao visualizar o processo produtivo e de acordo com o estado da instalação, funcionando em modo start e stop, a diminuição da temperatura entre produções não é muito desejável, influenciando a amplitude térmica que o cilindro tem de realizar para atingir a temperatura pretendida. Num possível trabalho futuro, seria importante estudar a possibilidade de desligar o cilindro a uma temperatura superior à atualmente praticada, para que, quando se retomasse a produção, a energia necessária para atingir a temperatura pretendida se minimizasse. Se assim acontecesse, obter-se-ia uma redução na amplitude térmica que o cilindro necessita realizar, mas tendo em atenção os filtros de mangas que se encontram a jusante do cilindro.

De acordo com o estudo realizado de comparação de valores de produção com o consumo de gás natural, tempo de funcionamento e observando o processo produtivo, conclui-se que o operador opera o cilindro exsicador de forma eficiente, tentando aproveitar o calor residual na produção de massas asfálticas e colmata o uso inicial do consumo de gás natural para aquecimento do cilindro sem agregados. Os consumos energéticos específicos são mais reduzidos durante os meses de verão devido a uma menor amplitude térmica sofrida pelos agregados e com menos perdas associadas ao processo. Inerente a este facto está o número de horas de funcionamento do cilindro exsicador, que indica uma produção contínua, com menos paragens, não consumindo tantos recursos energéticos nos arranques. Constata-se, assim, que a produção se processa de modo mais eficiente durante os períodos de verão que de inverno.

Conclui-se também que a possibilidade de substituição da caldeira de aquecimento de óleo térmico, para manutenção da temperatura do betume, auxiliaria na redução de custos com combustível por via da alteração do consumo de gás natural para biomassa, revertendo-se também numa mais-valia ambiental, através da anulação das emissões dos GEE. A principal desvantagem e mais importante condicionante para viabilizar a sua aplicação é o tempo de retorno do seu investimento.

Conclui-se também, que as principais limitações do modelo são: os valores de excesso de ar e rácio mássico, por estarem influenciados pela humidade do processo de secagem e pela queima de combustível; as condições de operabilidade da instalação, uma vez que o modelo se encontra de acordo com

---

as condições descritas na subsecção 3.3.2, e não de acordo com o estado atual da instalação.

O modelo não contempla nenhum consumo elétrico associado ao funcionamento da instalação, como por exemplo, o consumo elétrico dos motores, das bombas e da central de comando.

Enumera-se a possibilidade de realizar alguns trabalhos futuros, com o objetivo de minimizar/eliminar as limitações descritas, tais como: estudar as formas de funcionamento atuais do cilindro, determinando a eficiência do processo, a eficiência do queimador, os tempos efetivos de produção para cada mistura e a capacidades do misturador; analisar as temperaturas e constituições da emissão de GEE, associando-os à produção de cada mistura e à época do ano, por forma, a realizar um modelo que consiga estimar as temperaturas e emissões de GEE da instalação; incluir o consumo elétrico, tendo em conta, deste modo, todos os componentes que intervêm na produção de massas asfálticas, obtendo um valor total de consumo energético da instalação.

A realização do estudo associado à Prioridade S.A. foi muito importante, pois permitiu desenvolver e adquirir conhecimentos e possibilitou desenvolver trabalho numa área totalmente desconhecida (para o Autor, nomeadamente): produção de massas asfálticas. Foi possível conhecer o processo produtivo, tipos e modos de funcionamento, custos associados de matérias-primas, de produção e de venda e, principalmente, as principais preocupações e problemas diários encontrados face à conjuntura atual.



---

## CAPÍTULO VII - BIBLIOGRAFIA

BAPTISTA, António Miguel Costa - Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central Contribuição para o seu estudo e aplicação. 2006).

BUTTON, Joe W.; ESTAKHRI, Cindy; WIMSATT, Andrew - A Synthesis Of Warm-mix Asphalt. 7:2 (2007).

CAPITÃO, S. D.; PICADO-SANTOS, L. G.; MARTINHO, F. - Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 36:2012) 1016–1024. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038.

CHAZOURNES, LB De - Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. **UN's Audiovisual Library of International Law** ( 1998).

Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril - **act.gov.pt**. [Em linha]2008). 2222–2226. [Consult. 16 jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://www.act.gov.pt/(pt-PT)/Itens/Noticias/Documents/Aviso\_21616.pdf>.

Diretiva 2012/12/UE - 2012) 1–56.

**DSC - TGA** - [Em linha] [Consult. 2 nov. 2012]. Disponível em WWW:<URL:http://www.itc.tu-bs.de/Abteilungen/Makro/Methods/dsc.pdf>.

EAPA - Environmental Guidelines on Best Available Techniques ( BAT ) for the Production of Asphalt Paving Mixes. 2009).

EAPA - The use of Warm Mix Asphalt. January (2010) 1–13.

EAPA; NAPA - **The Asphalt Paving Industry A Global Perspective**. ISBN 0914313061.

ENERGIASRENOVAVEIS - **Conversão: Biomassa sólida** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 15 may. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://www.energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID\_conteudo=2&ID\_area=2&ID\_sub\_area=2>.

**engineeringtoolbox.com** - [Em linha] [Consult. 29 mar. 2014]. Disponível em WWW:<URL:http://www.engineeringtoolbox.com/>.

EP - Características dos materiais. 2009).

---

FCT - **DSC** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 2 nov. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.dq.fct.unl.pt/servicos-externos/calorimetria-diferencial-de-varrimento>>.

FERREIRA, Mário Quinta; BRANCO, Fernando Castelo - **Levantamento das Características dos Agregados produzidos em Portugal** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:<http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=jAkmkDD8CP0%3D&tabid=116&mid=487&language=pt-PT>>.

FORESTECH - **Bio Combustível Sólido** [Em linha] [Consult. 18 may. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.foresstech.pt/>>.

GALP - Fatura Energética Gás Natural. 2010) 3.

GILLESPIE, Iain - **Quantifying the energy used in an asphalt coating plant**

GOMES, Luís Filipe De Sousa - **Reciclagem de misturas betuminosas a quente em central** [Em linha]. [S.l.] : Universidade do Porto, 2005 [Consult. 23 feb. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=mRQbbgpMDjEC&oi=fnd&pg=PA15&dq=Universidade+do+porto&ots=LVA9bh1TPO&sig=0lvF-cL-IBin98aDqRiccjZ9vPW0>>.

GRABOWSKI, Wojciech; JANOWSKI, Łukasz - ISSUES OF ENERGY CONSUMPTION DURING HOT MIX ASPHALT ( HMA ) PRODUCTION. Young (2008) 5–8.

GRABOWSKI, WOJCIECH; JANOWSKI, LUKASZ; WILANOWICZ, Jaroslaw - **Problems of energy reduction during the hot-mix asphalt production**, atual. 2013.

INE - **Estatísticas do Ambiente 2012** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:[http://www.ine.pt/ngt\\_server/attachfileu.jsp?look\\_parentBoui=210191557&att\\_display=n&att\\_download=y](http://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=210191557&att_display=n&att_download=y),  
[http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes&PUBLICACOESpub\\_boui=153409799&PUBLICACOESmodo=2](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=153409799&PUBLICACOESmodo=2)>.

INIR - Construção e Reabilitação de Pavimentos Reciclagem de Pavimentos. [s.d.]).

JOHN D'ANGELO *et al.* - **Warm-Mix Asphalt : European Practice**

KOWALSKI, Stefan Jan (ED.) - **Drying of Porous Materials**. Poland : Springer Science + Business Media B.V. 2006, 2007. 66:233 p. ISBN 9781402054792.

LAND, C. M. Van't - Drying in the Process Industry. 2012).

LNEC - CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO NOVAS TÉCNICAS. 2005) 1–57.

LUIKOV, A. V. - Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 18:1 (1975) 1–14.

MATOS, M. Arlindo - **Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento Capítulo 2 – Combustão de combustíveis Índice**

MATOS, M. Arlindo - **Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento**

MIGUEL, António; BAPTISTA, Costa - Misturas Betuminosas Recicladadas a Quente em Central Contribuição para o seu estudo e aplicação. 2006).

MORAN, Michael J. *et al.* - **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7<sup>o</sup> Edition ed. ISBN 9780470495902.

MUJUMDAR, AS - **Handbook of industrial drying** [Em linha]. 151 – 171 p. [Consult. 14 apr. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=uKOGg1vk61MC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Handbook+of+industrial+drying&ots=IdLxGZ2Z3h&sig=Og\\_I Gm-nzEYZSlvxFszuSxlpSwQ](http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=uKOGg1vk61MC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Handbook+of+industrial+drying&ots=IdLxGZ2Z3h&sig=Og_I Gm-nzEYZSlvxFszuSxlpSwQ)>.

PORDATA - **Taxa de Inflação (Taxa de Variação - Índice de Preços no Consumidor)** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 8 jul. 2014]. Disponível em WWW:<URL:[http://www.pordata.pt/Portugal/Taxa+de+Inflacao+\(Taxa+de+Variacao+++Indice+de+Precos+no+Consumidor\)-138](http://www.pordata.pt/Portugal/Taxa+de+Inflacao+(Taxa+de+Variacao+++Indice+de+Precos+no+Consumidor)-138)>.

**Prioridade** - [Em linha] [Consult. 21 feb. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.prioridade.pt/apresentacao.htm>>.

**Protocolo de Quioto** - [Em linha] [Consult. 9 jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.dw.de/conferencia-do-clima-prorroga-protocolo-de-kyoto-até-2020/a-16439410>>.

Resolução do Conselho de Ministro de n.º 20/2013 de 10 de abril. [Em linha]. Diário da República: 1.ª série, N.º 70 (13- Disponível em WWW:<URL:<http://www.adene.pt/sites/default/files/0202202091.pdf>>.

**Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010** - [Em linha] [Consult. 19 jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.anafre.pt/noticias/imagens/Regimento.pdf>>.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 54/2010 de 4 de Agosto. . Diário da República: 1.ª série, N.º 150 (10- 1–2.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008 de 20 de Maio. . 2824 Diário da República: 1.ª série, N.º 97 (08- 2824–2865.

**RETSscreen Internacional** - [Em linha], atual. 2013. [Consult. 20 may. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.retscreen.net/pt/home.php>>.

---

ROCA - Caldeiras de biomassa. 2008).

SANTOS, Joana Micaela Rodrigues Dos - **Materiais Utilizados na Construção de Pavimentos Rodoviários**. [S.l.] : Universidade de Aveiro, 2010

SCHÄRLI, U.; RYBACH, Ladislaus - Determination of specific heat capacity on rock fragments. **Geothermics**. 30:2001).

SILVAPLUS - **Biomassa Florestal Primária** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 19 may. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.silvaplus.com/pt/biomassa-florestal-primaria/>>.

VENTIL - Biomassa - Fonte de energia sustentável. 2012).

WANG, Wei; MA, Hongxin; CHEN, Guohua - A Model for Drying of Porous Materials: From Generality to Specific Applications. **Drying Technology**. . ISSN 0737-3937. 29:13 (2011) 1542–1555. doi: 10.1080/07373937.2011.581774.

WAPLES, Douglas W.; WAPLES, Jacob S. - A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks. **Natural Resources Research**. . ISSN 1520-7439. 13:2 (2004) 97–122. doi: 10.1023/B:NARR.0000032647.41046.e7.

WAPLES, DW; WAPLES, JS - A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. Part 1: Minerals and nonporous rocks. **Natural resources research**. 13:2 (2004).

WHITAKER, Stephen - Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. 13:1977) 119–203.

XUE, Yongjie *et al.* - Effects of two biomass ashes on asphalt binder: Dynamic shear rheological characteristic analysis. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 56:2014) 7–15. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.075.