



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE
OPERAÇÃO DE UM FORNO DE FUSÃO DE VIDRO E A SUA
INFLUÊNCIA NAS EMISSÕES DE NO_x PARA A ATMOSFERA**

Teresa Sofia Cunha Ferreira

Orientador na FEUP: Professora Doutora Belmira Neto

Orientador na Empresa: Eng.º Sérgio Sousa

Setembro de 2010

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, à minha irmã e ao meu irmão todo o apoio que me deram.

Pelo apoio incondicional e pela força que me dá em tudo quero agradecer ao meu namorado, Tiago.

Quero agradecer em especial às minhas amigas Catarina e Marina que me ajudaram muito em todo o meu percurso. Também às minhas amigas Helena, Vanessa, Daniela, e a todos os meus amigos.

À minha orientadora, professora doutora Belmira Neto pelo apoio no trabalho, e a todas as pessoas da BA.

Resumo

O estudo aqui apresentado aborda a problemática das emissões de NOx associada à produção vidreira. Este baseou-se fortemente numa caracterização das emissões de NOx num forno específico, o AV5, da empresa BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes, de modo a poder inferir sobre quais os parâmetros de operação do forno de fusão do vidro que mais influenciam a emissão deste poluente. Este estudo visa constituir uma primeira abordagem que identifica e estuda os principais parâmetros que possam ser otimizados de modo a reduzir as emissões de NOx nos fornos de fusão da empresa.

A caracterização da evolução das emissões do poluente NOx foi conduzida através da identificação e estudo dos parâmetros que influenciam a formação do poluente. Esta foi feita para diferentes condições de funcionamento do forno, bem como para diferentes períodos de análise, compreendidos entre o ano de entrada em actividade do forno (2000) e a actualidade (2010).

Como principal resultado deste trabalho verificou-se que as emissões de NOx registadas no forno estudado cumprem os limites de emissão estipulados pela licença ambiental. Sobre os parâmetros foi possível concluir que são de facto significativos no que toca à emissão do poluente em estudo. A análise de medições no pórtilco do forno evidenciou a relação entre o poluente e o teor de oxigénio no gás de exaustão. No caso das medições na chaminé, verificou-se a importância da incorporação de casco na redução das emissões do poluente. Pela análise dos consumos do forno, produtividade diária e incorporação de casco conclui-se sobre a importância da incorporação desta matéria-prima na redução dos consumos energéticos do forno. Através da monitorização das emissões gasosas constata-se que com os parâmetros aqui apresentados é possível de facto reduzir as emissões do poluente. Por fim, na última análise verifica-se que a diminuição do rácio ar/gás tende a reduzir as emissões de NOx. Conclui-se ainda que apenas com a realização de ensaios experimentais é que seria possível determinar uma gama de operação dos parâmetros de funcionamento do forno à qual se pudesse associar uma redução das emissões de NOx.

Palavras-chave: Emissões de NOx; Forno regenerativo; Vidro

Abstract

The study presented here deals with the problem of NO_x emissions in the glass production industry. It was heavily based on a characterization of NO_x emissions in a glass furnace, the AV5, in the company BA Vidro S.A. – Unidade de Avintes, in order to infer about which operating parameters of the glass melting furnace influence the most the emission of this pollutant. This study is meant to be a first approach to this problem, identifying and examining the main parameters that can be optimized to reduce NO_x emissions in melting furnaces.

The characterization of the evolution of the pollutant NO_x emissions was conducted through the identification and study of the different parameters that influence the formation of the pollutant. This was done for different operating conditions of the furnace and for different periods of analysis, ranging from the furnace first operating year (2000) and the current year (2010).

The main result of that analysis was that NO_x emissions recorded meets the emission limits stipulated in the company's environmental permit. It was possible to conclude that parameters are indeed very important in the emission of the pollutant under study. The analysis of measurements made in the furnaces porch showed the relationship between the pollutant and oxygen content in the exhaustion gas. In the case of measurements made in the chimney, it's important to highlight the importance of the cullet if a reduction of the emissions of the pollutant is aimed. For the analysis of the consumption of the furnace, the daily productivity and the quantity of recycled glass relevance in the operation, the conclusion is that incorporating this raw material in the process, in order to reduce energy consumption in the furnace, brings satisfactory results. Through the monitoring of gaseous emissions it is possible to conclude that the parameters analyzed here can actually lead to a reduction of the emissions of the pollutant. Finally, it is possible to conclude that the decrease in the air / gas ratio tends to reduce NO_x emissions and that only the using of experimental tests would make possible the determination of an operating range of the parameters, in order to originate a NO_x emissions reduction.

Keywords: *NO_x emissions; Regenerative Furnace, Glass*

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo	iv
Abstract.....	vi
Índice	viii
Índice de Figuras	xii
Índice de Tabelas.....	xiv
Nomenclatura.....	xvi
Símbolos Químicos	xviii
Unidades	xx
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Fundamentos sobre o vidro de embalagem.....	1
1.2 Emissão de óxidos de azoto (NO _x) em fornos da indústria de vidro de embalagem.....	3
1.3 Impactes das emissões de óxidos de azoto	5
1.4 Limites legais para a emissão de NO _x em fontes estacionárias não contínuas .	7
1.5 Enquadramento, Objectivos e Âmbito do Estudo	8
1.6 Estrutura e organização da tese	9
Capítulo 2 – A empresa BA Vidro, S.A. - Unidade de Avintes. Processo de produção de vidro de embalagem e condições de operação do forno AV5	11
2.1 A empresa BA Vidro, S.A.....	11
2.2 Descrição do processo produtivo da BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes	13
2.2.1 Matérias-primas usadas no fabrico do vidro verde-esmeralda	15
2.2.2 Fusão.....	18
2.2.3 Fabricação /Moldação	19
2.2.4 Outros processos.....	20
2.3 O Forno regenerativo AV5.....	21

2.4 Parâmetros de funcionamento do forno que influenciam as emissões de NOx ...	25
Capítulo 3 – Emissão de NOx: Análise no Pórtico e na Chaminé	30
3.1 Introdução.....	31
3.2 Metodologia.....	31
3.2.1 Primeira Análise – Avaliação das emissões de NOx no pórtico do forno AV5	31
3.2.2 Segunda Análise – Avaliação das emissões de NOx na chaminé do forno AV5 determinadas pelo CTCV.....	33
3.3 Resultados.....	35
3.3.1 Primeira Análise – Avaliação das emissões de NOx no pórtico do forno AV5	35
3.3.2 Segunda Análise – Avaliação das emissões de NOx na chaminé do forno AV5 determinadas pelo CTCV.....	42
3.4 Conclusões.....	45
3.4.1 Primeira Análise – Avaliação das emissões de NOx no pórtico do forno AV5	46
3.4.2 Segunda Análise – Avaliação das emissões de NOx na chaminé do forno AV5 determinadas pelo CTCV.....	47
Capítulo 4 – Análise das condições de operação do forno AV5: Consumo energético, produtividade diária, incorporação de casco	49
4.1 Introdução.....	50
4.2 Descrição das metodologias	50
4.3 Conclusão	55
Capítulo 5 - Monitorização das emissões de NOx na chaminé e no pórtico: descrição e análise da medição.....	56
5.1 Descrição da metodologia usada	57
5.2 Análise dos resultados	59
5.2.1 Condições de operação do forno	59
5.2.2 Monitorização do NOx no pórtico.....	62

5.2.3 Monitorização na chaminé pelo CTCV	64
5.3 Conclusões.....	66
Capítulo 6 - Condições de operação do forno AV5 antes, durante e após a monitorização das emissões gasosas na chaminé.....	68
6.1 Introdução.....	69
6.1.1 Metodologia.....	69
6.2 Resultados.....	72
6.3 Conclusão	79
Capítulo 7 - Conclusões, limitações ao estudo e trabalhos futuros	81
7.1 Conclusões.....	81
7.2 Limitações do estudo.....	82
7.3 Trabalhos futuros.....	83
Referências bibliográficas	85
Anexo I – Processo de tratamento do casco	88
Anexo II - Cálculos efectuados para determinar o rácio ar/gás estequiométrico e o excesso de ar.....	90
Anexos IV – Outros parâmetros analisados no capítulo 3: medições no pórtico.....	94
Anexo V – Tabela usada na elaboração dos gráficos sobre as medições de NOx na chaminé do forno AV5	95
Anexo VI – Outros parâmetros analisados no capítulo 3: medições na Chaminé.....	96
Anexo VII – Tabela com dados de consumos específico do forno, incorporação de casco e produtividade diária ente 2005 e Fevereiro de 2010.....	97
Anexo VIII – Análise dos consumos, produtividade diária e incorporação de casco entre 2000 e Fevereiro de 2010	105
Anexo IX – Exemplo de análise ao consumo específico do forno em função da produtividade diária e da incorporação de casco.....	107

Índice de Figuras

Figura 1 – Localização das várias fábricas pertencentes à BA Vidro, S.A. ^[12]	12
Figura 2 – Fluxograma do processo produtivo da BA Vidro, S.A. – unidade de Avintes, incluindo as etapas que vão desde a preparação de matérias-primas até à expedição do produto acabado ^[15]	14
Figura 3 – Evolução da incorporação de casco no vidro VR	17
Figura 4 – Esquema ilustrativo do processo soprado-soprado: 1 - carregamento, 2 - compressão, 3 - sopro de Parison, 4 - transferência, 5 - sopro final, 6 – extracção (adaptado de [21]).....	20
Figura 5 – Esquema de um forno regenerativo com chama em U: A- Câmaras de Regeneração; B – Pórticos (Local de monitorização); C – Tanque de fusão (Divide-se em duas zonas: fusão e afinação); D – Garganta (local de saída do vidro fundido); E – Entrada das matérias-primas (adaptado de [3])	22
Figura 6 – Vista de cima do forno - percurso efectuado pela chama dentro do tanque de fusão ^[19]	22
Figura 7 – Vista de perfil do tanque de fusão visto dividindo a zona de fusão e a de afinação (adaptado de [19])	23
Figura 8 – Monitorização das emissões de NOx no pórtico (média da medição nos dois pórticos) do forno AV5 durante a produção de vidro verde-esmeralda	36
Figura 9 – Temperaturas registadas pela leitura óptica e da parede do forno AV5	39
Figura 10 – Emissão de NOx e o rácio ar/gás registados no forno AV5.....	41
Figura 11 - Relação entre as emissões de NOx e a %O ₂ no	41
Figura 12 - Relação entre as emissões de NOx e o casco incorporado	41
Figura 13 - Relação entre as emissões de NOx e o consumo de gás natural.....	41
Figura 14 - Relação entre as emissões de NOx e a leitura óptica da temperatura.....	41
Figura 15 - Relação entre as emissões de NOx e a temperatura da parede final do forno	41
Figura 16 - Monitorização das emissões de NOx do forno AV5 pelo CTCV durante a produção de vidro verde-esmeralda no período 2000-2009	42
Figura 17 - Relação entre as emissões de NOx e a %O ₂ na chaminé.....	44
Figura 18 – Relação entre as emissões de NOx e incorporação de casco	44
Figura 19 – Relação entre as emissões de NOx e o consumo de gás natural (GN).....	44

Figura 20 – Consumo específicos médios de energia em função da produtividade diária e para diferentes percentagens de casco incorporado.....	52
Figura 21 – Evolução do consumo específico em função da tiragem para 70% de casco incorporado.....	53
Figura 22 – Exemplo de um Testo 350 XL	57
Figura 23 – Exemplo de um Testo 300	57
Figura 24 – Chaminé do forno AV5.....	58
Figura 25 - Chaminé do forno AV5, localização da plataforma de amostragem	58
Figura 26 – Pórtico esquerdo do forno AV5	63
Figura 27 - Evolução da temperatura da perde e da leitura óptica da temperatura do forno AV5.....	72
Figura 28 – evolução da produtividade diária registada para a produção do vidro VR no período analisado.....	74
Figura 29 - Evolução da incorporação de casco de vidro no forno AV5	75
Figura 30 - Evolução dos consumos específicos de energia do forno AV5.	75
Figura 31 - Evolução do consumo específico do AV5 aplicado no momento da monitorização para o período analisado (2005 a Junho de 2010)	77
Figura 32 – Evolução da temperatura da parede aplicada no momento da monitorização para o período analisado (2005 a Junho de 2010)	77
Figura 33 – Emissão de NOx e do rácio ar/gás registado durante a monitorização semestral das emissões gasosas no forno AV5 no âmbito do diploma legal de monitorização.	78
Figura 34 – Emissão de NOx e % de O ₂ registado durante a monitorização semestral das emissões gasosas no AV5, no âmbito do diploma legal de monitorização	79

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Composição típica do vidro de embalagem ^[4]	2
Tabela 2 – Produção de vidro VR (t/ano) entre 2005 e 2009	13
Tabela 3 – Especificações para controlo da qualidade do casco ^[16]	16
Tabela 4 – Composição química típica do vidro verde-esmeralda ^[17]	17
Tabela 5 – Dimensões e capacidade do forno AV5 ^[18]	24
Tabela 6 – Consumos específicos médios (Kcal / kg de vidro VR) para várias produtividades e incorporações de cacso. Valores registados no período 2005 a Fevereiro de 2010	52
Tabela 7 – Condições do forno registadas nos dois ensaios.....	59
Tabela 8 – Caudais registados inicialmente para os queimadores de baixo NOx	61
Tabela 9 – Ângulo vertical de posicionamento dos queimadores	62
Tabela 10 – emissões gasosas registadas nas medições no pórtilco pelo 1º e 2º ensaios	63
Tabela 11 – Emissões gasosas registadas para o 1º e 2º ensaios em termos de monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NOx) e oxigénio (O ₂)	65
Tabela 12 – Condições de operação do forno AV5 (valores médios diários e valores usados durante as monitorizações) - temperaturas (°C), tiragem (t/dia), % de incorporação de casco, consumo específico (kcal/kg), rácio ar/gás, % de O ₂ no gás de exaustão e emissão de NOx (mg/Nm ³ , a 8% de O ₂).....	71

Nomenclatura

APCER	- Associação Portuguesa de Certificação
AC	- Relação ar/combustível em massa
AV5	- Forno regenerativo de fusão de vidro
Afinantes	- Matéria-prima usada para facilitar a remoção de bolhas
Borbulhadores	Equipamento que liberta bolhas de ar para ajudar a homogeneizar a temperatura do vidro
Bref	- Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry
Casco	- Resíduo de vidro
Consumo específico	- Energia necessária para produzir um quilograma de vidro
Corante	- Matéria-prima usada para dar cor ao vidro
COV	- Compostos Orgânicos Voláteis
CTCV	- Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro
Feeder	- Canal que transpõe o vidro entre o forno e as máquinas de moldação
Marisa	- Gargalo da garrafa
MTD	- Melhores Tecnologias Disponíveis
Pirómetro	- Aparelho de medição usado na medição de altas temperaturas
Pórtico	- Zona do forno localizada entre o tanque e as câmaras de regeneração: Local de monitorização
Tiragem	- Produtividade diária
VLE	- Valor Limite de Emissão
VR	- Verde-esmeralda

Símbolos Químicos

NO	-	Monóxido de Azoto
NO ₂	-	Dióxido de Azoto
NO _x	-	Óxidos de azoto
CO	-	Monóxido de Carbono
CO ₂	-	Dióxido de Carbono
SO ₂	-	Dióxido de Enxofre
CH ₄	-	Metano
HCN	-	Cianeto de Hidrogénio
HNO ₃	-	Ácido Nítrico
O ₂	-	Oxigénio
SiO ₂	-	Dióxido de Silício
Na ₂ O	-	Óxido de Sódio
CaO	-	Óxido de Cálcio
MgO	-	Óxido de Magnésio
Al ₂ O ₃	-	Óxido de Alumínio
K ₂ O	-	Óxido de Potássio
SO ₃	-	Trióxido de Enxofre
FeCr ₂ O ₄	-	Cromite de Ferro

Unidades

°C	-	Graus Celsius
%	-	Porcentagem
t	-	Toneladas
g	-	Gramas
atm	-	Atmosferas
ppm	-	Partes por milhão
mg	-	miligramas
m ³	-	Metros cúbicos
kcal	-	Kilocalorias
kg	-	Kilogramas
min	-	minutos
m	-	Metros
mmH ₂ O	-	Milímetros de coluna de água
h	-	Hora
kPa	-	kiloPascal
K	-	Kelvin
mol	-	Mole
kJ	-	kiloJoule
kW	-	kiloWatt

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Fundamentos sobre o vidro de embalagem

O vidro pode ser designado como um sólido não cristalino, com uma estrutura periódica atómica, e que possui uma zona com um comportamento de transformação, também designada por zona de transição vítrea. Na sua estrutura, os vidros são comparáveis a líquidos, contudo à temperatura ambiente a sua viscosidade é de tal modo elevada que o leva a ser comparado a um sólido ^{[1], [2]}.

A produção industrial do vidro não se limita à utilização de sílica uma vez que apesar de esta produzir um vidro de grande qualidade necessita de grandes temperaturas de fusão (acima de 1725°C). A produção industrial de vidro resulta de uma mistura específica de matérias-primas, que podem conduzir à fabricação de diferentes tipos de vidros, cuja classificação é função da composição química ^[2].

Existem vários tipos de vidros, o que é consistente com as inúmeras aplicabilidades deste material. A pureza, a versatilidade e a impermeabilidade são características importantes do vidro e que justificam a sua ampla utilização no mercado ^[2]. Na Europa, verifica-se uma predominância da produção de vidro de embalagem, sendo este cerca de 60% do total de vidro produzido. O vidro de embalagem é usado em todo o tipo de garrafas de vinhos, refrigerantes, embalagens para produtos alimentares e ainda na indústria farmacêutica ^[3].

O uso do vidro para embalagem assenta nos seguintes factores: a protecção da natureza e a protecção do consumidor. Estas duas características são extremamente valiosas para o sector do vidro e devem ser valorizadas não só pelos produtores mas também pelos consumidores que assim não só ajudam a preservar a natureza, uma vez que o vidro é 100% reciclável, como se podem sentir mais seguros à qualidade do produto que compram ^[2].

Um dos tipos de vidros mais comuns na indústria vidreira é o sódico cálcico, sendo este o único tipo de vidro de embalagem produzido pela indústria vidreira Portuguesa. O vidro sódico-cálcico assenta na adição de óxidos de sódio responsáveis por baixar a temperatura de fusão. São também usados, entre outros, os óxidos de cálcio que actuam

como estabilizantes. A Tabela 1 apresenta a composição química típica utilizada na produção de vidro de embalagem em Portugal ^[4].

Tabela 1 – Composição típica do vidro de embalagem ^[4]

<i>Componente químico</i>	<i>Composição (%)</i>	<i>Matéria-prima</i>
Areia - SiO ₂	71 – 73	Areia
Óxido de sódio – Na ₂ O	12 – 14	Carbonato de sódio
Calcário - CaO	9 – 12	Calcário
Óxido de magnésio MgO	0,2 – 3,5	Dolomite
Óxido de alumínio – Al ₂ O ₃	1 - 3	Feldspato/areia/alumina
Óxido de potássio - K ₂ O	0,3 - 1,5	Feldspato/areia/calcário
Trióxido de enxofre - SO ₃	0,05 – 0,03	Sulfatos e fuel
Corantes	Vestígios	

A produção de vidro de embalagem exige a preparação de uma mistura específica de matérias-primas, sendo que cada componente possui uma função específica. As matérias-primas podem ser classificadas como agentes vitrificantes, fundentes, estabilizantes, afinantes e corantes ^{[2], [5]}.

Os fundentes são agentes que reduzem a temperatura de fusão da mistura, facilitando a fusão do vidro. Entre os agentes fundentes mais comuns, o mais utilizado na produção de vidro sódico-cálcico é o carbonato de sódio ^{[2], [5]}.

Os estabilizantes são importantes pois impedem a solubilização do vidro, sendo o mais comum, na indústria vidreira em Portugal, o óxido de cálcio. Outros agentes estabilizantes, como por exemplo, o óxido de magnésio e o óxido de alumínio (alumina), podem ser aplicados juntamente com o óxido de cálcio. A adição de óxido de cálcio é um factor importante devendo ser criteriosamente avaliada pois em excesso, promove a cristalização e, em defeito, leva a uma perda de durabilidade química que pode impedir que o vidro seja usado como embalagem. A durabilidade química do vidro refere-se ao facto de este ser resistente ao ataque de soluções ácidas, não o sendo da mesma forma para soluções alcalinas, o que origina alterações superficiais no vidro. Uma vez em contacto com soluções alcalinas, ocorre remoção de sílica do vidro ^{[2], [5]}.

A adição de substâncias de afinação (designadas por afinantes) na mistura tem por objectivo remover as bolhas formadas na fusão. Apesar de adicionados em pequenas quantidades, são agentes muito importantes no processo pois a remoção das bolhas é um parâmetro de relevo na qualidade do produto final. Dentro destas substâncias estão incluídos o nitrato de potássio e alguns sulfatos.

A função dos corantes é a de atribuir a cor e, entre os mais comuns, utilizados na produção de vidros verdes, estão a cromite e os óxidos de ferro ^{[2], [5]}.

Actualmente, outra matéria-prima de grande importância utilizada na indústria vidreira é o casco. O casco de vidro, proveniente da reciclagem, é tratado e incorporado na mistura a fundir. A importância económica e ambiental que a utilização desta matéria-prima acarreta levou a um aumento considerável na sua utilização. Ao mesmo tempo que se aumenta a incorporação de casco na produção de vidro, são efectuados tratamentos cada vez melhores de forma a remover a maior quantidade e impurezas possíveis e melhorar a qualidade da sua aplicação. Sendo o vidro totalmente reciclável este material possui um grande potencial ecológico que deve ser valorizado ^{[3], [5]}.

1.2 Emissão de óxidos de azoto (NO_x) em fornos da indústria de vidro de embalagem

Como em qualquer actividade humana, a produção de vidro é responsável por impactes ambientais associados, para além de aspectos, como o elevado consumo de recursos energéticos necessário à fusão das matérias-primas. A queima de combustíveis fósseis tem como consequência a libertação de emissões gasosas contendo, por exemplo, partículas, CO₂, SO₂ e NO_x. As elevadas temperaturas necessárias para o processo bem como os consumos energéticos são os principais problemas causadores de impacto ambiental ^[3]. Apesar de serem emitidos vários poluentes, o NO_x é um dos principais problemas desta indústria. Embora existam tecnologias para a redução/controlo das emissões de NO_x, constata-se que as condições de queima podem afectar significativamente a emissão do poluente, que pode exceder o valor definido como limite de emissão em documentos legais ^[3].

Os compostos azotados, conhecidos como NO_x incluem substâncias como NO e NO₂. A produção de NO_x pode ter origem em fontes naturais e antropogénicas. A origem

antropogénica é a que possui a principal parcela na actual formação deste poluente, através do sector dos transportes rodoviários. A actividade industrial representa uma relevante parcela na emissão deste poluente através da queima de combustível em fontes estacionárias. Tendo em conta a oxidação do NO a NO₂ que ocorre quando este é emitido para a atmosfera, a regulação jurídica aplicada a este poluente estabelece limites assumindo este pressuposto, logo a emissão de NO_x vem tipicamente expressa em termos de NO₂ ^{[6], [7]}.

A formação de NO_x pode ocorrer por diferentes processos, NO_x térmico, NO_x rápido e NO_x combustível ^[6]. A formação de NO_x devido às elevadas temperaturas de trabalho é o principal mecanismo de formação do poluente, e acontece devido ao facto de a temperaturas elevadas, o azoto existente no ar de combustão reagir com o oxigénio. As principais reacções envolvendo a formação de NO e NO₂ são as seguintes ^[6]:



Estas reacções decorrem por etapas, processos intermédios, onde participam radicais livres que são substâncias altamente energéticas. O mecanismo mais utilizado para explicar a formação de NO_x térmico é conhecido por mecanismo de Zeldovich ^[6]. Segundo o método referido, o radical de oxigénio (O) ataca as moléculas de azoto (reacção 3). Seguidamente, o radical de azoto vai reagir com o oxigénio, formando monóxido de azoto (reacção 4). Outra hipótese apresentada pelo método de Zeldovich sugere que o radical de azoto reage com o hidróxido (reacção 5) ^[6].



A formação de NO_x rápido dá-se logo no início da combustão, através da reacção entre os radicais carbónicos do combustível e o azoto, como está representado na equação 6. O azoto resultante da reacção química (5) reage com o oxigénio segundo a reacção (4),

aumento na formação do NO ^[6]. O HCN formado na reacção (6) vai reagir parcialmente com o oxigénio produzindo NO e, posteriormente com o NO produzindo N₂. A formação de NO rápido é insignificante quando comparada com a formação térmica ^[6].



Reacção (6)

A formação de NO_x a partir do combustível representa outra origem possível de formação do poluente. Este processo consiste na oxidação do azoto existente no combustível, neste caso do gás natural cuja constituição é maioritariamente metano contudo inclui uma pequena parcela de azoto ^[3].

Na indústria vidreira existe ainda a possibilidade de se formar NO_x a partir da decomposição do azoto existente nas matérias-primas utilizadas na composição ^[3]. Esta foi uma possibilidade excluída, no presente caso de estudo, pois as matérias-primas aqui utilizadas não contêm compostos azotados.

Por último refere-se que a formação de NO_x a elevadas temperaturas pode ser minimizada se forem controlados determinados parâmetros do processo como, por exemplo, os picos de temperatura de chama, a quantidade de oxigénio disponível para combustão, especificamente aquele disponível nos picos de temperatura e ainda a duração dos picos de temperatura. Outros parâmetros que podem estar associados à formação do NO_x térmico são o consumo de gás natural e a quantidade de ar nos gases de exaustão ^[6].

1.3 Impactes das emissões de óxidos de azoto

A emissão de óxidos de azoto para a atmosfera é responsável por diversos impactes consideráveis tanto na saúde humana como no meio ambiente.

A emissão de NO₂ e ainda a emissão NO que posteriormente reage transformando-se em NO₂ pode provocar sérios problemas respiratórios ^[7].

Embora o NO emitido não apresente grande potencial tóxico, a exposição aguda às emissões de NO₂ causam sérios problemas como declínio da função pulmonar, como irritações respiratórias, bronquite. Se a exposição a esse poluente decorrer de forma

prolongada podem ocorrer alterações irreversíveis tanto a nível da estrutura como da função pulmonar ^[7].

Para além dos problemas respiratórios, este poluente tem efeitos a nível do agravamento de problemas cardíacos, podendo ainda levar a mortes prematuras ^[7].

Mas este poluente não causa problemas apenas na saúde humana, uma série de impactes ambientais são influenciados por estes poluentes.

Um dos impactes ambientais mais significativos da emissão de compostos azotados está associado com a formação de ozono troposférico. Este forma-se a partir de reacções fotoquímicas entre componentes designados como precursores do ozono, como é o caso dos NOx e a radiação solar. Em ambientes menos poluídos, a formação de ozono troposférico ocorre segundo as seguintes reacções ^[7]:



Onde:

$h\nu$ Radiação solar

M Molécula que absorve o excesso de energia

Em ambientes mais poluídos, a existência de compostos orgânicos voláteis (COV) na atmosfera vai criar novos mecanismos de oxidação dos NOx. Nestes casos, quanto maior a quantidade de NOx menor a formação de ozono ^[7].

Verifica-se que a formação de ozono é um problema grave, sentido essencialmente em zonas pouco poluídas ^[7].

Outro impacte causado pela emissão de compostos azotados é a acidificação. Este poluente reage formando ácidos, como o caso do ácido nítrico (HNO₃) que ao depositarem causam a acidificação dos ecossistemas. A deposição ácida pode ocorrer na forma de chuva, neve ou partículas secas. O NOx pertence também a um grupo de gases com impacte em termos de aquecimento global ^[7].

Assim, devido aos inúmeros impactos causados pelo poluente em causa, é essencial garantir que são tomadas medidas para minimizar as emissões de compostos azotados para a atmosfera.

1.4 Limites legais para a emissão de NO_x em fontes estacionárias não contínuas

A prevenção e controlo das emissões de poluentes para a atmosfera está regulada juridicamente pelo Decreto-Lei nº 78/2004 de 3 de Abril ^[8]. Segundo este decreto, a imposição de valores limite de emissão (VLE) tem por objectivo o controlo da saúde humana e do ambiente, sendo uma forma de controlar a poluição atmosférica. Relativamente aos limites de emissão, o decreto remete-nos para a existência de portarias conjuntas onde esses valores se encontram definidos, no caso a portaria 286/1993 de 12 de Março segundo a qual é definido que o VLE de aplicação geral do NO_x é de 1500 mg/Nm³ expresso em NO₂ para um teor de 8% de O₂ e gás seco ^[9].

No caso específico do forno AV5 da unidade da BA Avintes, as emissões atmosféricas são limitadas pelos valores apresentados na licença ambiental da fábrica, emitida no âmbito de aplicação do Decreto-Lei nº 194/2000 de 21 de Agosto, relativo à Prevenção e Controlo Integrados da Poluição ^[10]. Importa referir no entanto, que este decreto foi revogado pelo Decreto-Lei nº 173/2008 de 26 de Agosto. A licença ambiental da fábrica ^[11] define os procedimentos, VLE e frequências de amostragem das emissões. Na licença é definido como valor limite de emissão, aplicável na chaminé, o valor de 1200 mg/Nm³, expresso em NO₂ para um teor de 8% de O₂ e gás seco, relativamente à frequência de amostragem é definido que a monitorização das emissões deve ser feita duas vezes em cada ano civil, e espaçada de pelo menos dois meses. Este último valor está em vigor desde Julho de 2008 ^[11]. Refere-se ainda que o regime aplicável às instalações abrangidas pelo Decreto-Lei nº 194/2000 de 21 de Agosto, agora revogado pelo Decreto-Lei nº 173/2008 de 26 de Agosto, relativo à prevenção de controlo integrados da poluição, aos quais esteja associada a licença ambiental, prevalece sobre o Decreto-Lei nº 78/2004 de 3 de Abril no que respeita às emissões atmosféricas ^[8].

1.5 Enquadramento, Objectivos e Âmbito do Estudo

O enquadramento deste estudo assenta na necessidade de melhorar o conhecimento dos parâmetros de operação dos fornos de fusão que mais contribuem para a emissão de NOx para a atmosfera, visando otimizar as medidas primárias existentes na BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes e assim reduzir as emissões deste poluente de forma consistente e melhorar o desempenho ambiental da actividade.

A melhoria do conhecimento contribuirá para que a BA Vidro se prepare antecipadamente para o cumprimento de valores limite de NOx que serão previsivelmente cada vez mais restritivos.

Como objectivo primordial inclui-se a caracterização das condições de funcionamento do forno em relação, mais especificamente, à variação dos parâmetros de funcionamento do forno que possam influenciar a formação de emissões de NOx. Com base nesta caracterização pretende-se estabelecer relações entre os parâmetros de funcionamento do forno e as emissões de NOx medidas na chaminé. A identificação e análise dos parâmetros de operação do forno, considerados importantes na emissão de NOx, poderão ser importantes para a identificação de práticas para a redução das emissões de NOx.

O estudo visou as condições e parâmetros de funcionamento de um dos fornos (o forno designado por AV5) do grupo BA Glass I- Serviços de Gestão e Investimento S.A., ao qual pertence a empresa BA Vidro S.A. - Unidade de Avintes. Foram estudadas as condições de operação do forno para um tipo específico de vidro, o vidro verde-esmeralda (VR). Os dados recolhidos e analisados reflectem as condições de operação desde 2000 até agora.

As principais razões que tornaram o vidro verde-esmeralda o foco deste trabalho estão relacionadas com a maior incorporação de casco permitida por este tipo de vidro, juntamente com o facto de a chaminé associada ao forno emitir exclusivamente os gases provenientes deste (AV5), sendo esta emissão periodicamente analisada, cumprindo os diplomas legais, para determinar as emissões gasosas de vários poluentes, entre eles o composto NOx.

1.6 Estrutura e organização da tese

Este primeiro capítulo (Introdução) enquadra brevemente o tema abordado, delineando a problemática associada ao tema e descrevendo alguns aspectos associados à produção de vidro de embalagem e às emissões de NO_x resultantes do processo de produção. Este capítulo inclui também o enquadramento jurídico (legislação ambiental) existente para as emissões de NO_x em fontes fixas. É apresentado ainda o resumo do trabalho realizado, a definição do enquadramento, objectivo e âmbito do mesmo e descrita a estrutura e organização da presente tese.

O segundo capítulo apresenta o grupo BA Glass I – Serviços de Gestão e Investimentos, S.A., do qual faz parte a empresa BA vidro, S.A. – Unidade de Avintes. É descrito todo o processo de produção de vidro de embalagem realizado na unidade, focando com maior pormenor o processo de fusão e os processos que o antecedem. O capítulo inclui ainda a descrição do forno e o tipo de vidro em foco nesta análise. São ainda identificados os parâmetros considerados como os que influenciam a formação de NO_x.

No terceiro capítulo são analisadas as emissões de NO_x referentes ao período de actividade 2008 e 2009, no caso das medições efectuadas no pórtilco, e entre 2000 e 2009 para as realizadas na chaminé. Os registos analisados têm origem na informação recolhida internamente pela BA Avintes (emissões de NO_x no pórtilco) ou, em alternativa, tem origem em monitorizações realizadas por uma entidade externa à empresa (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro - CTCV), no âmbito da disposição legal para cumprimento dos valores limite de emissão de NO_x estipulados na licença ambiental.

No quarto capítulo é analisada informação sobre, nomeadamente, o consumo específico de energia no forno (proveniente do uso de gás natural e electricidade), a produtividade média diária do forno e a incorporação de casco de vidro na fusão. O período de análise remete para os anos compreendidos entre 2000 (ano de arranque do forno) e 2010.

O quinto capítulo foca a monitorização das emissões gasosas, realizada recentemente no forno AV5 da fábrica de Avintes. Neste capítulo são analisados os valores de emissão de NO_x registados para a chaminé e pórtilco durante dois ensaios. Descreve-se sucintamente a amostragem e o método de ensaio do poluente. Esta análise visa analisar o modo como os parâmetros do forno seleccionados podem afectar as medições.

No capítulo seis é apresentado o resumo das condições de operação do forno, para os parâmetros considerados como mais significativos para as emissões de NO_x. É analisado um período próximo a cada monitorização (dois dias antes e depois) entre 2005 e 2010.

Finalmente, no capítulo sete são apresentadas as principais conclusões obtidas no estudo, as limitações da análise efectuada e as recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – A empresa BA Vidro, S.A. - Unidade de Avintes.

Processo de produção de vidro de embalagem e condições de operação do forno AV5

Resumo

Este capítulo apresenta o grupo BA Glass I – Serviços de Gestão e Investimentos, S.A., focando-se essencialmente na empresa BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes, também designada por BA Avintes.

É descrito o processo produtivo do vidro de embalagem seguido pela BA Avintes, onde são abordadas as etapas de preparação das matérias-primas, fusão, fabricação, recozimento, inspecção, embalagem, decoração e expedição.

Em seguida é analisado o forno regenerativo – AV5, objecto de análise neste estudo, no que respeita as características estruturais do forno, sendo referidos os seus constituintes, bem como o seu modo de funcionamento.

Posteriormente, são listados os parâmetros de operação do forno que mais influenciam as emissões de NOx. Estes parâmetros são identificados a partir da revisão bibliográfica realizada ao tema da formação de NOx em fornos de fusão.

Por fim são listadas algumas medidas referidas como sendo parte das melhores tecnologias disponíveis para redução das emissões de NOx, nos fornos de fusão da indústria de vidro de embalagem.

2.1 A empresa BA Vidro, S.A

A sociedade Barbosa e Almeida, designada actualmente por BA Vidro, SA, é uma das grandes indústrias vidreiras nacionais pertencendo ao grupo BA Glass I- Serviços de Gestão e Investimento SA. Actualmente a BA Vidro, SA é constituída por cinco unidades fabris (Figura 1), três delas localizadas em Portugal, nomeadamente, a BA Avintes, a Venda Nova e a da Marinha Grande. As outras duas estão em Espanha, mais especificamente em Vila Franca de Los Barros e Leon. O grupo emprega 1300 colaboradores e produz anualmente 4 biliões de embalagens, usando diferentes cores de

vidro, nomeadamente, âmbar, branco, branco azulado, branco *flint*, branco UV, preto, verde escuro, verde esmeralda (VR), verde UV, verde geórgia e folha morta ^[11].

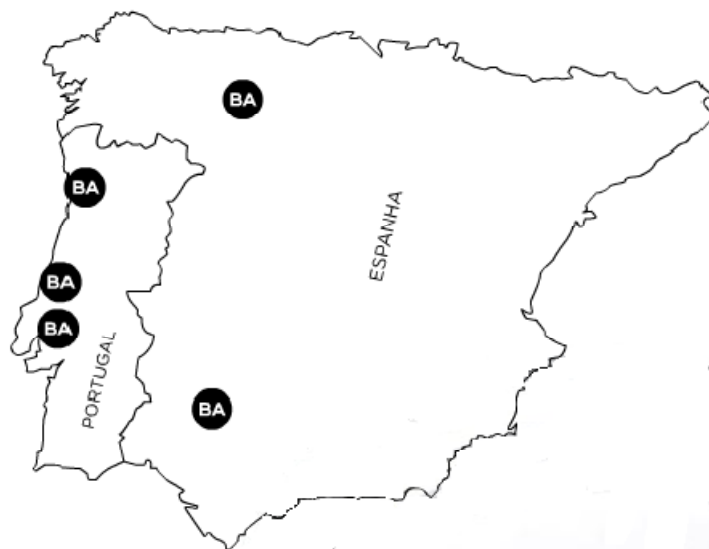


Figura 1 – Localização das várias fábricas pertencentes à BA Vidro, S.A. ^[12]

A BA Vidro S.A., dedica-se exclusivamente ao fabrico de vidro de embalagem, sendo a sua missão desenvolver, produzir e vender embalagens essencialmente para a indústria alimentar e de bebidas, com a produção de garrafas e frascos. No entanto, tem vindo a explorar novos mercados produzindo também para a indústria cosmética e farmacêutica ^[12].

No ano de 2008, a empresa apresentou um volume de negócios de 290 milhões de euros, obtendo um resultado líquido de cerca de 44 milhões de euros ^[12].

O trabalho aqui apresentado foi realizado na unidade de Avintes (BA Avintes). A produção diária nesta unidade é de cerca de 752 t/dia, distribuída por três fornos, designados por AV2, AV4 e AV5 ^[12]. O foco de estudo neste trabalho é o processo realizado no forno AV5, e mais especificamente a produção de vidro verde-esmeralda (VR) neste forno. Realça-se que, no entanto este não é o único tipo de vidro produzido neste forno. A produção do AV5 distribui-se entre o vidro verde-esmeralda, verde UV e por vezes verde-escuro.

O vidro verde-esmeralda (VR) pertence ao grupo dos vidros verdes e caracteriza-se por ser um vidro oxidado ^[13]. O corante usado na formação da cor do vidro VR é a cromite de ferro (FeCr_2O_4). Por ser um vidro oxidado, pode levar uma maior incorporação de casco, o que permite operar o forno a temperaturas mais baixas ^[14].

A produção anual do vidro em estudo depende das exigências do mercado. A Tabela 2 apresenta a produção anual do vidro verde-esmeralda produzido na empresa entre 2005 e 2009 (Anexo VII, Tabela VII-17).

Tabela 2 – Produção de vidro VR (t/ano) entre 2005 e 2009

	2005	2006	2007	2008	2009
Produção anual de vidro verde-esmeralda (t/ano)	44.905	69.602	19.339 ¹	57.608	45.790

2.2 Descrição do processo produtivo da BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes

O processo produtivo na BA Avintes engloba etapas como a preparação das matérias-primas, a composição da mistura a vitrificar, fusão, moldação, recozimento, controlo de qualidade, embalamento, terminando com a expedição do produto final (Figura 2) ^[15]. Neste trabalho a etapa de fusão destaca-se das outras por ser a etapa essencial onde ocorre formação do poluente. Optou-se por isso, em detalhar as operações realizadas até ao processo de fusão. Em seguida, descreve-se as operações de preparação de matérias-primas, tratamento do casco e fusão.

¹ A diminuição da produtividade verificada em 2007 deve-se à mistura da produção com garrafas mais pequenas. Como são realizados moldes mais pequenos a quantidade de vidro necessário diminui, o que consequentemente baixa a produtividade.

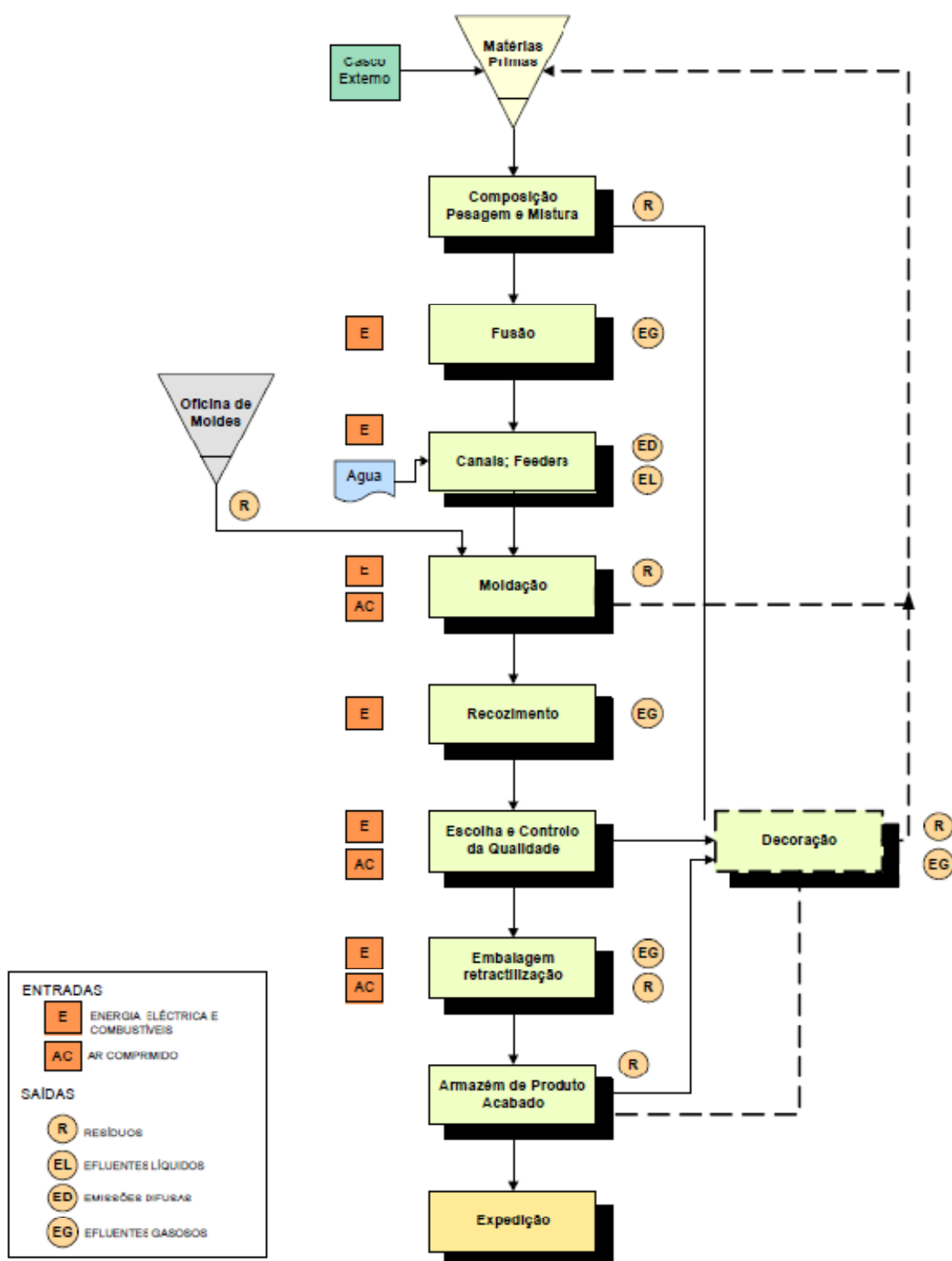


Figura 2 – Fluxograma genérico do processo produtivo de vidro, incluindo as etapas que vão desde a preparação de matérias-primas até à expedição do produto acabado ^[15]

2.2.1 Matérias-primas usadas no fabrico do vidro verde-esmeralda

A composição é uma etapa do processo cuidadosamente controlada pois alterações nas matérias-primas como, por exemplo, a incorporação de casco com elevada quantidade de contaminantes, areias com granulometrias fora das especificações, doses desajustadas de matérias-primas como estabilizantes e, a elevada humidade da mistura originam consequências negativas na qualidade do produto final ^[15].

As matérias-primas usadas no fabrico de vidro verde-esmeralda incluem areia, carbonato de sódio, calcário, carvão (em pequenas quantidades) sulfato de sódio, cromite de ferro. É ainda incorporado casco de vidro, proveniente da reciclagem de vidro de embalagem. As matérias-primas são inicialmente armazenadas em silos e depois misturadas cuidadosamente em proporções específicas que dependem do tipo de vidro que se quer produzir ^[15].

O casco de vidro incorporado na produção de vidro verde-esmeralda é sujeito a um tratamento que visa remover impurezas como os cerâmicos, compostos orgânicos ou ainda metais. Esta matéria-prima pode ter sido tratada previamente antes da entrada na fábrica, pode ainda ser tratada na estação de tratamento de casco da BA, ou no caso de ser resultante dos rejeitados do processo de fabrico de vidro é apenas triturada ^[15].

Na produção de vidro verde-esmeralda usa-se maioritariamente casco proveniente da estação de tratamento da BA, designado por casco de mistura, juntamente com casco interno, com origem nos rejeitados da produção.

O casco proveniente do exterior é inspeccionado no controlo de qualidade, sendo este independente da inspecção efectuada na estação de tratamento. Para tal recolhe-se uma amostra de 10 kg de casco, à qual é feita uma inspecção visual com o intuito de separar os componentes cerâmicos, os metais ferrosos e não ferrosos, sendo estes pesados de modo a verificar se cumprem as especificações de qualidade estabelecidas pela fábrica. Componentes orgânicos, como cortiça, tecidos, papel, plásticos ou mesmo outros vidros só podem estar presentes em quantidades muito pequenas, não havendo especificações definidas para estes parâmetros ^[15].

Os processos de tratamento do casco incluem, após recepção a primeira separação dos materiais ferrosos, a britagem, a segunda separação de materiais (ferrosos e não ferrosos), o transporte e uma primeira separação granulométrica seguida de uma

segunda separação que inclui também uma separação manual de orgânicos. O produto final tratado é transportado para a eira onde é armazenado até utilização. O Anexo I (Tabela I-13) descreve em detalhe o processo de tratamento ^[11].

O casco limpo deve respeitar as especificações para a contaminação por impurezas e composição granulométrica (Tabela 3). Estas especificações são válidas para todo o tipo de casco, não havendo nenhuma condição especial no que respeita à incorporação deste no vidro VR ^[16].

Tabela 3 – Especificações para controlo da qualidade do casco ^[16]

<i>Contaminação por impurezas</i>			<i>Composição granulométrica</i>	
Contaminantes	Exemplos	Especificações (g/t)	Dimensões	Especificações (%)
<i>Metais magnéticos</i>	Cápsulas, latas, ferros	< 5	> 5 cm	0
<i>Metais não magnéticos</i>	Alumínio, chumbo, estanho	< 10	> 4,1 cm	≤ 3,5
<i>Componentes cerâmicos</i>	Porcelana, argila, louça de barro	< 50	< 0,5	≤ 5
<i>Componentes orgânicos</i>	Papel, cortiça, tecidos		-	-
<i>Plásticos</i>	Recipientes, sacos, fios	a)	-	-
<i>Outros vidros</i>	De laboratório, lâmpadas, tv, vitrocerâmica		-	-

a) Componentes orgânicos, plásticos ou outros vidros não são desejáveis e apenas são admitidos vestígios.

Na Figura 3 é visível a evolução do casco incorporado no vidro VR entre 2005 e 2009 (Anexo VII, Tabela VII-17).

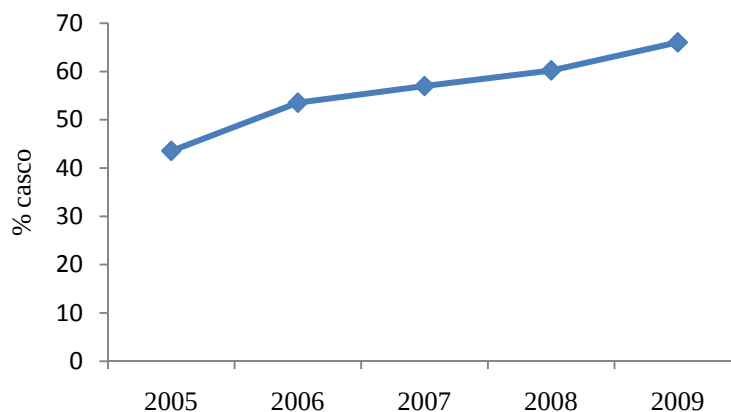


Figura 3 – Evolução da incorporação de casco no vidro VR

O papel cada vez mais importante do casco nesta indústria é visível no facto de numa incorporação de 1 t de casco se traduzir na poupança de 1,2 t das restantes matérias-primas provenientes de recursos naturais, como por exemplo, a areia, calcário, carbonato de sódio ^[3].

Da reacção entre as matérias-primas usadas para produção de vidro VR, resulta a composição química do vidro (Tabela 4).

Tabela 4 – Composição química típica do vidro verde-esmeralda ^[17]

<i>Composição química</i>	<i>%</i>
SiO ₂	71,1
Al ₂ O ₃	2,58
Fe ₂ O ₃	0,34
CaO	10,66
MgO	0,76
Na ₂ O	12,8
K ₂ O	1,29
Cr ₂ O ₃ ,	0,25
SO ₃	0,18
PbO	0,03

2.2.2 Fusão

Após preparação da mistura das matérias-primas e casco de vidro, esta é introduzida no forno de fusão, onde é fundida, homogeneizada e afinada ^[15]. O gás natural é o combustível usado na fusão, sendo que a produção de vidro é um processo contínuo, grande utilizador de energia e de matérias-primas. A fusão tem início entre os 750 e os 1200°C. A areia e sílica presentes na mistura combinam-se com os óxidos de sódio e outros componentes formando silicatos. O processo decorre e conclui-se quando a mistura se torna transparente. Embora o valor dependa da composição da mistura, a temperatura necessária para fundir o vidro varia entre os 1300 e os 1550°C ^[3].

As reacções químicas que ocorrem durante a fusão do vidro podem resumir-se nas seguintes ^[18]:



O tempo de residência para a produção de vidro num forno regenerativo é no mínimo 24h ^[3]. Após a fusão realiza-se a afinação que visa a libertação dos gases, removendo as bolhas que podem afectar a qualidade do produto final. O processo de afinação ocorre numa zona específica do forno (zona de afinação) e visa a libertação das bolhas do vidro fundido. Este processo requer tempo e ocorre pois a temperaturas elevadas a viscosidade do vidro diminui, permitindo a libertação dos gases ^[2]. A existência dos borbulhadores (localizados entre as duas zonas do tanque de fusão – zona de fusão e de afinação) auxilia a afinação do vidro, criando correntes de convecção que permitem uma maior homogeneização da temperatura deste ^[19].

Durante a fusão é realizado um controlo rigoroso dos parâmetros de operação do forno. Estes incluem, entre outros, o controlo de temperaturas, nomeadamente as temperaturas do vidro, da parede final do forno, da zona de saída do vidro fundido e das câmaras de regeneração. Este controlo da temperatura do vidro e do forno é importante para garantir que o vidro fundido pode ser trabalhado nas melhores condições. Para além da

temperatura também é controlado pelos operadores da fábrica os consumos de gás natural e electricidade, o rácio ar/gás, a produtividade do forno, a incorporação de casco, a pressão do forno bem como do gás natural e o nível de vidro dentro do forno.

Após a fusão segue-se a fabricação/moldação, o recozimento, a inspecção, o embalamento, a decoração e a expedição do produto ^[15]. De seguida são descritas sucintamente estas etapas.

2.2.3 Fabricação /Moldação

A fabricação/moldação ocorre numa área designada por zona de trabalho. A massa fundida sai do forno e é conduzida por canais (designados por feeders) aquecidos por gás natural até às máquinas de moldação. Aí procede-se ao corte do fluído gota-a-gota que depois entre no molde e através de um processo do tipo soprado-soprado forma-se o molde da garrafa (Figura 4). Na produção de vidro existe ainda outro processo para formação do molde das garrafas denominado por prensado-soprado, este no entanto não é usado no forno AV5, não sendo por isso aqui descrito ^{[3], [15]}.

O processo soprado-soprado inclui seis etapas, esquematicamente apresentadas na Figura 4, que são o carregamento, compressão, sopro de Parison, transferência, sopro final, extracção ^[20].

O carregamento consiste na entrada da gota no pré-molde. A compressão baseia-se na entrada de ar comprimido no pré-molde, formando-se aqui a marisa (gargalo) da garrafa. O sopro de Parison (pré-formato) consiste na injeção de ar comprimido dentro da massa do vidro, obrigando a tomar o formato do pré-molde. Na transferência, o pré-formato da garrafa passa do pré-molde para o molde final, onde vai ocorrer o sopro final, formando-se a garrafa que é por fim extraída do molde ^[20].

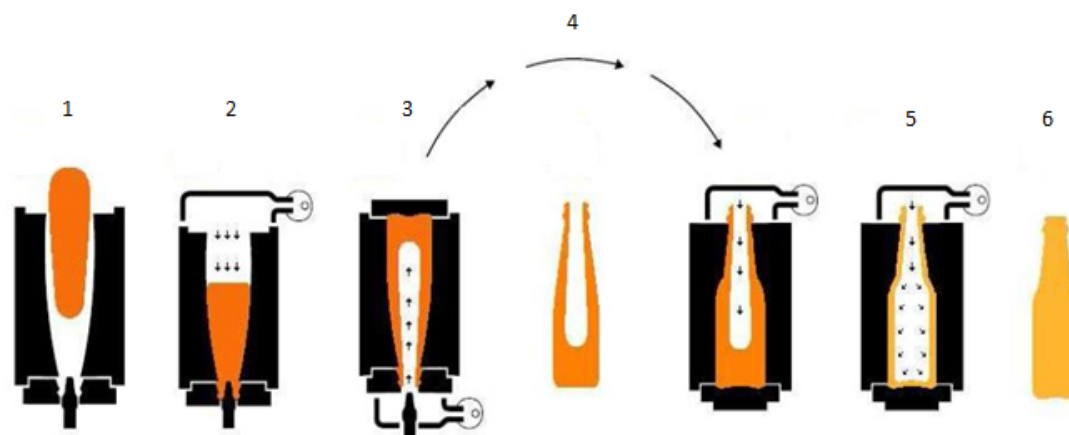


Figura 4 – Esquema ilustrativo do processo soprado-soprado: 1 - carregamento, 2 - compressão, 3 - sopro de Parison, 4 - transferência, 5 - sopro final, 6 – extracção (adaptado de [21])

2.2.4 Outros processos

- **Recozimento**

Durante a moldação do vidro são criadas tensões na garrafa que tem que ser aliviadas, caso contrário, um arrefecimento brusco levaria à destruição do produto. Na arca de recozimento, as garrafas são aquecidas até uma temperatura de cerca de 550° C, seguindo depois um arrefecimento controlado do produto de modo a garantir a estabilidade molecular necessária ^[15].

- **Inspecção**

A inspecção verifica de forma manual ou automática a conformidade do produto, sendo que todo aquele que for rejeitado é utilizado internamente e entra novamente no processo constituindo o casco interno ^[15].

- **Embalagem**

O produto é paletizado, sendo depois as paletes acondicionadas com plásticos e retratilizadas (envolvidas por um plástico) de modo a proteger o vidro. Por fim, são enviadas para o armazém de expedição ^[15].

- **Decoração**

A decoração ocorre apenas em algumas garrafas e inclui processos de rotulagem. Os métodos incluem a serigrafia, que consiste na impressão de ecrãs com tintas cerâmicas que gravam rótulos nas garrafas e a aplicação de etiquetas ^[15].

- **Expedição**

Depois de concluído o processo, o produto acabado segue para o cliente ^[15].

2.3 O Forno regenerativo AV5

Os fornos regenerativos são usados na indústria vidreira e podem apresentar diferentes configurações que possibilitam a recuperação de calor do processo. Na generalidade, estes fornos são mais eficientes que os restantes que usam combustíveis fósseis pois o seu sistema de aquecimento de ar de combustão é mais eficiente ^[3]. A maior eficiência dos fornos regenerativos permite reduzir os seus consumos energéticos, contudo, as elevadas temperaturas de pré-aquecimento são mais propícias à formação do NOx.

Entre os fornos regenerativos, existem diferentes configurações, nomeadamente o *cross-fired* e o *end-fired*, sendo que entre os dois o último, também designado por forno regenerativo com chama em U, é o que geralmente demonstra melhores resultados em termos de eficiência energética e emissões mais baixas ^[3].

O forno AV5 é do tipo regenerativo com chama em U (*end-fired regenerative furnace*), sendo esta designação atribuída devido ao percurso efectuado pela chama dentro do forno ^[3]. Este forno tem um tempo de vida já alto, pois opera há dez anos e o período de vida útil de um forno deste tipo situa-se entre sete a doze anos para um funcionamento em contínuo ^[4].

A Figura 5 representa um esquema ilustrativo de um forno regenerativo com chama em U, à semelhança do AV5.

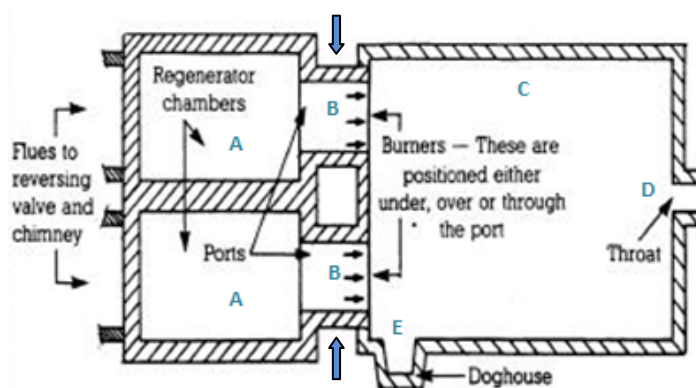


Figura 5 – Esquema de um forno regenerativo com chama em U: A- Câmaras de Regeneração; B – Pórticos (Local de monitorização); C – Tanque de fusão (Divide-se em duas zonas: fusão e afinação); D – Garganta (local de saída do vidro fundido); E – Entrada das matérias-primas (adaptado de [3])

Este forno possui um tanque de fusão e duas câmaras de regeneração, construídas com material refractário, que funcionam como permutadores de calor, possibilitando uma maior eficiência energética do forno (Figura 6) [3], [19].

A Figura 6 (vista de cima) ilustra o percurso efectuado pela chama dentro do tanque de fusão do forno.

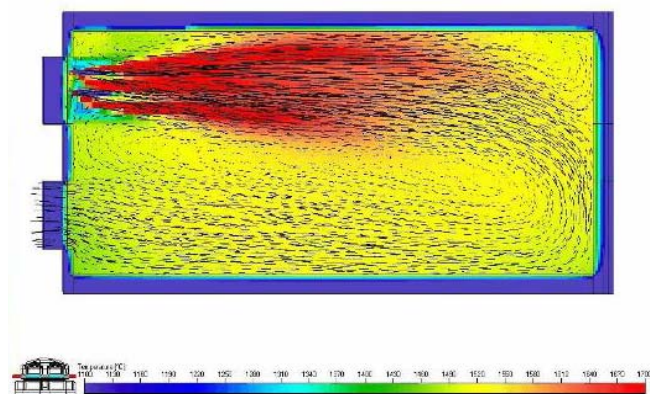


Figura 6 – Vista de cima do forno - percurso efectuado pela chama dentro do tanque de fusão [19]

O tanque de fusão do AV5 subdivide-se em duas zonas, a primeira de maior extensão, designa-se por zona de fusão, e a seguinte por zona de afinação (Figura 7). No caso do AV5 estas duas áreas encontram-se separadas por borbulhadores, que tem por objectivo garantir uma boa homogeneização da temperatura do vidro, impedindo assim que este passe, sem fundir, da zona de fusão para a zona de afinação. Os borbulhadores fazem entrar ar no tanque, criando correntes de convecção no vidro fundido [19].

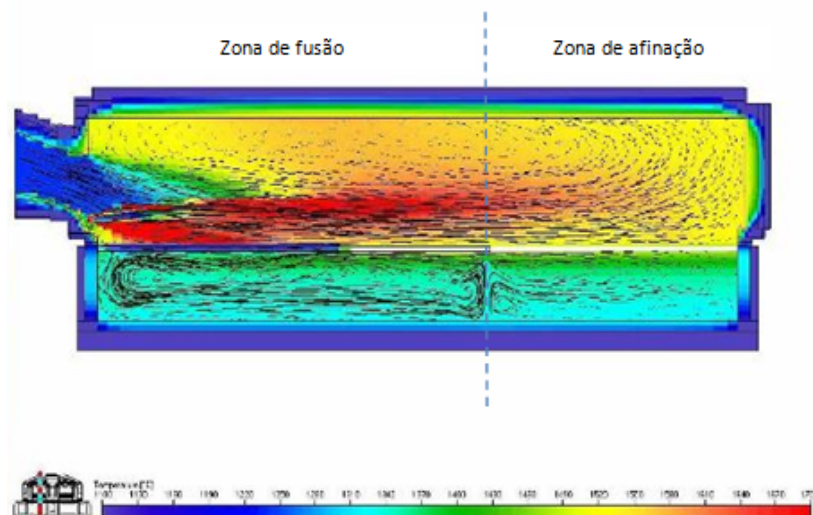


Figura 7 – Vista de perfil do tanque de fusão visto dividindo a zona de fusão e a de afinação (adaptado de [19])

Entre o tanque de fusão e as câmaras de regeneração encontra-se uma zona designada por pórtico. No caso do forno AV5, é possível encontrar dois pórticos, um para cada câmara de regeneração (Figura 5). Estes são os locais onde se realizam as medições de NO_x pelos operadores fabris, através de uma abertura que permite o controlo da formação de poluentes como o NO_x, CO, CO₂, bem como do teor de oxigénio no gás de exaustão.

Sob os pórticos estão instalados oito queimadores de baixo NO_x (quatro em cada pórtico). O princípio de funcionamento destes queimadores assenta numa mistura lenta entre o ar de combustão e o gás natural tendo como consequência a redução da velocidade mínima de injeção mantendo-se a combustão completa, uma elevada emissividade² de chama, que ao levar à ruptura térmica dos gases do combustível, possibilita uma maior capacidade de emissão de radiação o que por sua vez diminui a temperatura da chama [3]

O processo de combustão do forno recorre a ciclos de inversões, que no caso do AV5 são tipicamente de 30 minutos. Em cada ciclo o ar de combustão entra numa das câmaras de regeneração, sendo desse lado que decorre a queima. Em simultâneo, a outra câmara é aquecida pelos gases de exaustão. Ao fim desse período, o processo é invertido; passando a câmara, por onde foi feita a exaustão dos gases, a receber o ar de combustão [3], [19].

² Capacidade de emitir radiação. É dada pela razão entre o poder emissivo de um determinado corpo e a de um corpo negro.

A câmara que procedeu à exaustão do gás e que passou agora a receber o ar de combustão encontra-se a temperaturas elevadas, conduzindo à permuta de calor e ao aquecimento do ar ^[3].

Através da permuta de calor entre a câmara de regeneração e o ar de combustão é possível levar a que este atinja valores na ordem, ou superiores a 1400 °C ^{[3], [4]}. No caso específico do forno AV5, o ar é aquecido até temperaturas de 1100 °C ^[15]. O pré-aquecimento do ar de combustão é responsável pelo aumento da eficiência energética do forno, permitindo que sejam atingidas temperaturas de aproximadamente 1580 °C, no caso do forno AV5 ^{[3], [19]}.

Para além do gás natural, o forno AV5 usa também electricidade, sendo esta responsável por uma pequena parte do consumo energético total do forno. Os eléctrodos usados no aquecimento estão distribuídos lateralmente no fundo do forno. O consumo de electricidade é usado essencialmente para controlar a temperatura do vidro, através do aquecimento do fundo (ou soleira) do forno com o intuito de manter a temperatura do vidro fundido o mais constante possível. Controlando esta temperatura, garante-se uma melhor afinação do vidro ^[19].

A alimentação do forno é feita lateralmente, através de enfornadoras que automaticamente fazem entrar no forno a mistura previamente preparada ^[19].

A Tabela 5 identifica as dimensões do forno AV5 bem como a sua capacidade nominal ^{[15], [19]}.

Tabela 5 – Dimensões e capacidade do forno AV5 ^[18]

<i>Área do tanque de fusão (m²)</i>	136
<i>Altura do tanque (m)</i>	4,25
<i>Capacidade nominal (t/dia)</i>	367

2.4 Parâmetros de funcionamento do forno que influenciam as emissões de NOx

O controlo dos parâmetros de funcionamento é essencial para garantir a fusão em condições que garantam um produto de qualidade. Este controlo é feito a partir da sala de comando da fusão, onde são visualizados num programa computacional todas as informações importantes sobre o AV5. Entre todos os parâmetros controlados no processo operacional foi necessário fazer uma selecção daqueles que influenciariam a emissão do poluente NOx, de modo a serem apenas esses os focados no presente estudo.

Os parâmetros operacionais aqui recolhidos e analisados incluem a temperatura do forno (através da análise da temperatura da parede e da leitura óptica), da temperatura da parede final do forno, a percentagem de incorporação de casco de vidro, o rácio ar/gás de combustão, o teor de oxigénio no gás de combustão e o consumo energético diário do forno (que inclui o consumo de gás natural e de electricidade). Estes parâmetros são registados na fábrica e estão disponíveis para o forno AV5 desde 2000. Os registos existentes são geralmente valores médios diários para cada um dos parâmetros. Não foi possível obter, para todas as análises efectuadas, os registos de todos os parâmetros para uma periodicidade inferior, ou seja não estão disponíveis os valores usados nos cálculos das médias diárias. Ainda, os valores diários usados neste trabalho resultam da média de medições realizadas de duas em duas horas, para cada um dos parâmetros considerados.

A escolha destes parâmetros em detrimento de outros assentou na pesquisa bibliográfica efectuada sobre quais seriam os parâmetros que mais significativamente influenciam a emissão de NOx em fornos de fusão e mais concretamente na indústria vidreira. As emissões de NOx resultam essencialmente da reacção entre o oxigénio e o azoto a elevadas temperaturas, sendo por isso a temperatura da fusão e o ar de combustão parâmetros essenciais no estudo. A revisão bibliográfica efectuada permite afirmar que a temperatura, o combustível usado, a quantidade de ar fornecido são parâmetros importantes para a formação de NOx ^{[3], [6], [7], [18]}.

- **Controlo da temperatura do forno**

O controlo da temperatura do forno é efectuado em diversos pontos do forno, contudo os valores considerados mais importantes são a leitura óptica da temperatura e a temperatura da parede do forno.

A temperatura obtida através da leitura óptica é a que melhor informa sobre a temperatura a que o forno se encontra. É medida com recurso a um pirómetro e é registada durante a inversão da queima de modo a evitar as interferências da chama. O local de medição desta temperatura é a vigia que se encontra na parede final do forno. Embora este não seja um procedimento contínuo são normalmente registados dois valores de temperatura em cada duas horas.

A temperatura da parede do forno é medida por um termopar colocado na parede oposta às câmaras de regeneração, acima do banho líquido de vidro, também designado nível do vidro. Esta temperatura é considerada importante pois funciona como *set point* do forno, controlando a entrada de gás no forno. O valor ao qual deve ser mantida a temperatura da parede é introduzido no programa pelos operadores, sendo depois a entrada de gás natural automaticamente ajustada de modo a manter-se a temperatura pretendida.

O termopar encontra-se colocado ao nível da chama formada dentro do forno, sendo por isso a temperatura por ele registada afectada pelo comprimento atingido pela chama. O termopar é um instrumento sensível que sofre desgaste ao longo do tempo, desta forma torna-se ainda mais importante completar a análise com a leitura óptica da temperatura para garantir a fiabilidade dos valores aqui apresentados. Enquanto que a temperatura da parede nos informa sobre o valor registado na proximidade do termopar, a leitura óptica indica a temperatura ambiente do forno, sendo este último o valor real para a temperatura do forno.

Apesar das diferenças entre a temperatura da parede e da leitura óptica, estas estão relacionadas na medida em que se uma se encontrar muito elevada a outra também o estará. No que respeita à leitura óptica, se for verificado que esta se apresenta demasiado elevada, é pela redução do valor da temperatura da parede (*set point* do forno) que esta é corrigida.

- **Incorporação de casco**

A incorporação de casco no processo de produção de vidro é outro parâmetro importante pois reduz a temperatura necessária para a fusão. Isto acontece pois as reacções endotérmicas associadas à fusão do vidro já estão completas e a massa do casco é inferior em 20% à das equivalentes matérias-primas ^[3]. Consequentemente, o seu aumento implica uma redução no consumo energético e obviamente na redução das emissões do poluente NOx. Teoricamente, ao aumentar a incorporação de casco em 10 % seria de esperar reduções no consumo energético do forno entre 2 a 3 % ^[3].

O casco usado no vidro de embalagem pode variar entre valores inferiores a 20%, ou superiores a 90 %, sendo no caso da União Europeia registada uma média de incorporação de cerca de 48 % ^[3].

O casco, depois de tratado, é introduzido através da mistura cuidadosamente preparada, sendo actualmente das principais matérias-primas usadas na produção do vidro verde-esmeralda.

- **Rácio ar/gás de combustão**

Por se tratar de um combustível gasoso, o rácio ar /gás usado na combustão é determinado pela razão dos volumes de ar e de gás natural, usados na combustão ^[21]. Este é um parâmetro muito importante neste estudo pois permite calcular qual o volume de ar disponível na reacção. O azoto proveniente do ar usado para a combustão é a principal fonte para a formação dos compostos de NOx ^{[3], [6]}.

Considerando a reacção estequiométrica, a determinação do rácio ar/gás é feita através do seguinte procedimento. Assume-se que o gás natural possui na sua composição unicamente metano (CH₄) e que a reacção ocorre em condições de 1 atm e 20 °C. Feitos os cálculos o rácio ar/gás estequiométrico para a reacção de combustão é de 9,57 (Anexo II - 1). Contudo na prática é usado um valor superior, sendo no caso do forno aqui em estudo tipicamente aplicado um rácio ar/gás de 13, considerado o necessário para garantir uma combustão completa. Para este rácio, o excesso de ar calculado é de 36 %, ao qual corresponde 7,2 % de excesso de oxigénio (Anexo II - 2).

No processo de controlo operacional do forno, o rácio ar/gás é um parâmetro estipulado pelo operador, como tal, sempre que ocorre uma alteração na injeção de gás natural, o ar de combustão é igualmente ajustado de modo a manter o mesmo rácio ar/gás.

- **Quantidade de oxigénio no gás de exaustão**

Este parâmetro é um indicador da quantidade de oxigénio que ficou disponível para formar NOx, sendo igualmente útil para controlar a formação de monóxido de carbono (CO) dentro do forno. Este parâmetro permite avaliar a adequabilidade do rácio ar/gás utilizado na combustão sendo que, se for superior a 5 % está a ser utilizado um rácio demasiado elevado e se for inferior a 1 % o rácio pode não ser suficiente ^[14].

Este parâmetro é registado juntamente com o valor do NOx, ou seja reflecte o valor relativo ao período de monitorização das emissões gasosas.

- **Consumo energético**

Este parâmetro avalia os consumos do forno, salienta-se no entanto, que o consumo de gás natural possui a maior cota de uso de energia por oposição ao consumo eléctrico no forno. O consumo de gás natural é importante para a emissão de NOx pois à sua combustão são associadas as altas temperaturas atingidas no forno. Por este motivo o gás natural é o parâmetro relativo ao consumo energético mais detalhadamente estudado neste trabalho. O consumo de electricidade, não afectando directamente a emissão de compostos de NOx, poderá eventualmente explicar em conjunto com o consumo de gás natural o padrão de funcionamento típico do forno.

A injeção do gás natural é feita por queimadores de baixo NOx, estes localizados sob os pórticos. O caudal de gás natural é distribuído pelos queimadores de uma forma específica. Sob cada pórtico estão instalados quatro queimadores, sendo que o caudal decresce do queimador mais próximo da parede lateral do forno para o queimador mais próximo do centro do forno. O consumo de gás natural é medido em m³/h, no entanto para podermos comparar este consumo com o de electricidade foi usada uma unidade comum, kcal/kg, a conversão de unidades encontra-se demonstrada no Anexo III.

O consumo de electricidade dá-se através de eléctrodos colocados lateralmente no fundo do forno. Este consumo é registado em KWh, sendo a conversão para kcal/kg apresentada no Anexo III.

Os parâmetros seleccionados são importantes para o controlo da emissão de NOx no forno regenerativo estudado, visando a redução do poluente em causa. No presente estudo, estes foram analisados de forma mais detalhada com intuito de avaliar a possibilidade de determinar uma possível relação causa-efeito entre eles, com o objectivo de definir modos característicos de funcionamento e performance do forno correspondentes.

Por comparação com as melhores tecnologias disponíveis (MTD) para os fornos de fusão da indústria vidreira, foi possível verificar que, actualmente, a empresa possui algumas dessas MTD apresentadas em documentos de referência para minimização do poluente NOx. As medidas primárias de redução do poluente existentes na empresa são a incorporação de casco de vidro (este constitui uma parte importante para a produção de vidro), o uso de queimadores de baixo NOx e o controlo do teor de oxigénio dentro do forno ^[3].

Como consideração final, neste estudo visa-se a análise dos parâmetros acima citados individualmente e por confrontação com a emissão de NOx, de modo a poder inferir sobre o estabelecimento de possíveis relações do tipo causa-efeito entre estes e a emissão de NOx.

Capítulo 3 – Emissão de NOx: Análise no Pórtico e na Chaminé

Resumo

O presente capítulo tem como objectivo verificar a influência de alguns parâmetros, como sejam a temperatura (leitura óptica e temperatura da parede), consumo de gás natural, incorporação de casco, teor de oxigénio do gás de exaustão e rácio ar/gás considerados como importantes na formação dos óxidos de azoto (NOx).

Este capítulo divide-se em duas análises distintas, na primeira, são recolhidos e tratados dados relativos à medição de NOx no pórtico do forno AV5 entre 2008 e 2009. Esta monitorização é efectuada pelos operadores da fábrica para avaliar as emissões do poluente e controlar a queima. Nesta análise, foram estudadas possíveis relações entre a emissão de NOx e alguns parâmetros já referidos, nomeadamente o rácio ar/gás, percentagem de oxigénio no gás de exaustão, incorporação de casco, consumo de gás natural, a temperatura da parede do forno e leitura óptica da temperatura.

Na segunda análise, são recolhidos e tratados dados de 2000 a 2009 e são analisadas as medições efectuadas pelo Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV), no âmbito do diploma legal (Licença ambiental da BA Avintes), que define os valores limite de emissões para o NOx e a necessidade de se efectuar duas medições em cada ano civil. Nesta análise são estudadas as possíveis relações entre os valores de NOx e os parâmetros relativos à incorporação de casco, percentagem de oxigénio no gás da exaustão e consumo de gás natural.

As duas análises não tratam os mesmos parâmetros apenas por uma questão de recolha de dados, ou seja, para as medições do CTCV, os dados fornecidos não incluíam parâmetros de funcionamento como temperaturas ou rácio ar/gás, sendo esta a razão pela qual estes não foram incluídos na análise.

Das análises conclui-se que, devido à descontinuidade das medições e à diferença na escala temporal dos parâmetros analisados das emissões de NOx, se torna difícil estabelecer relações entre a evolução da emissão do poluente e a variação dos parâmetros.

A diferença na escala temporal dos dados analisados deve-se ao facto de as emissões de NOx se referirem a valores pontuais, obtidos num determinado momento, enquanto alguns dos parâmetros representam valores médios diários obtidos através da média dos registos efectuados ao longo do dia. Estes valores médios diários não permitem observar qual a variação real que o parâmetros apresenta ao longo do dia, o que dificulta a interpretação dos resultados e a criação de relações entre os parâmetros e o NOx.

Realça-se ainda que o facto da segunda análise considerar quase todo o tempo de funcionamento do forno (2000 a 2009) parece ser o motivo pelo qual se consegue retirar algumas relações importantes entre as emissões de NOx e os parâmetros de funcionamento do forno.

3.1 Introdução

A formação de óxidos de azoto no forno é influenciada por diferentes parâmetros, sendo os principais a temperatura, quantidade de ar na combustão e o combustível usado ^[3].

O presente caso avalia os parâmetros considerados mais importantes na emissão de NOx incluindo, a temperatura da parede do forno, leitura óptica da temperatura, o rácio ar/gás, teor de oxigénio no gás de exaustão, o consumo de gás natural e a percentagem de casco.

3.2 Metodologia

Foram recolhidos e analisados dados relativos às medições do poluente NOx no forno AV5 da fábrica BA Avintes, bem como de alguns dos seus parâmetros de funcionamento, nomeadamente, rácio ar/gás, percentagem de oxigénio no gás de exaustão, incorporação de casco, consumo de gás natural, temperatura da parede do forno, leitura óptica da temperatura e produtividade diária (tiragem).

3.2.1 Primeira Análise – Avaliação das emissões de NOx no pórtico do forno AV5

Aqui foi efectuada a recolha de informação dos valores das emissões de NOx do forno AV5, medidas no pórtico, e alguns dos parâmetros de operação do forno,

nomeadamente, rácio ar/gás, percentagem de oxigénio no gás de exaustão, incorporação de casco, temperatura da parede do forno e leitura óptica da temperatura e consumo de gás natural³. Esta recolha visa a determinação de relações entre os parâmetros de estudo e o NOx de modo a identificar possíveis linhas orientadoras para a redução do poluente no forno AV5. Analisaram-se valores respeitantes aos anos de 2008 e 2009.

A dificuldade em estabelecer relações entre os parâmetros e a emissão de NOx depois de analisados os anos de 2008 e 2009 fez com que se iniciasse outra análise, evidenciando não valer a pena continuar esta análise para anos anteriores.

As medições são feitas recorrendo a um equipamento (Testo 300), no qual a sonda de recolha de gás é introduzida numa mangueira polímera, onde é inserida na extremidade oposta uma cana refractária, que vai proceder à recolha dos gases. Antes de cada medição, é feita a calibração por recolha de ar ambiente (oxigénio a 21%) e, concentração de NOx a 0 ppm. Os valores registados pelo aparelho de medição são obtidos em base seca.

A amostragem é realizada em cada um dos pórticos, que se encontram em posições opostas no forno. Tendo em conta que cada ciclo de queima decorre por 30 min, sendo que depois ocorre a inversão, a amostragem dá-se durante esse período, não sendo feita nenhuma recolha durante a inversão. Quando o ciclo de queima termina, a cana de recolha dos gases é retirada, sendo depois novamente calibrada antes de ser introduzida no outro pórtico.

Depois de efectuada a medição, os dados recolhidos referentes ao NO, NO₂, NOx e teor de oxigénio são tratados, sendo registados apenas durante 2 ou 3 minutos, para a medição em cada pórtico, do total analisado.

Os dados de NOx e teor de oxigénio obtidos nas medições são os apresentados na presente análise.

Os dados recolhidos foram tratados de modo a converter as unidades das concentrações de NOx (partes por milhão - ppm) em unidade de massa por unidade de volume

³ Foram também analisados outros parâmetros, como o consumo eléctrico do forno, a temperatura do vidro e a produtividade média diária. Contudo por não se verificarem existirem relações entre estes parâmetros e a formação de NOx a informação obtida é disponibilizada no Anexo IV.

(mg/Nm³)^[7]. Este valor foi ainda corrigido para 8% de oxigénio (de acordo com a Equação 1), tal como é exigido na licença ambiental da fábrica^{[11], [23]}.

$$NOx(mg/Nm^3) = NOx(ppm) \times \frac{M}{V} \times \frac{21 - \%O_2 \text{ referência}}{21 - \%O_2 \text{ medido}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

<i>NO_x</i>	Emissão de NO _x expressa em mg/Nm ³ e ppm
<i>M</i>	Massa molar do contaminante, ou seja, massa molar do NO ₂ expresso em g/mol
<i>V</i>	Volume molar, que em condições normais (PTN) é igual a 22,4 dm ³ /mol;
<i>O₂ referência</i>	Teor de oxigénio exigido por lei para normalização das emissões dos poluentes expresso em %
<i>O₂ medido</i>	Oxigénio registado na medição expresso em %

3.2.2 Segunda Análise – Avaliação das emissões de NOx na chaminé do forno AV5 determinadas pelo CTCV

Foram recolhidos dados relativos às emissões de NOx monitorizados pelo Centro Tecnológico de Cerâmica e do Vidro (CTCV), no âmbito da obrigatoriedade de medição bianual. As medições realizadas pela referida entidade são usadas na avaliação do cumprimento do VLE estipulados para as emissões atmosféricas da fábrica^[11]. Recolheu-se ainda dados referentes a parâmetros associados à operação do forno AV5, no que concerne ao teor de oxigénio no gás de exaustão, incorporação de casco e consumo energético⁴.

Foram recolhidos, tratados e analisados dados de 2000 a 2009 de modo a identificar possíveis relações importantes entre os parâmetros de funcionamento do forno e a emissão de NOx. A análise considerou este período pois os dados recolhidos referiam-se ao mesmo e este representa o período de vida do forno.

De modo a procurar relações mais conclusivas entre a emissão de NOx e os parâmetros monitorizados no forno foram analisados os valores das caracterizações das emissões

⁴ Outros parâmetros como tiragem do forno e o consumo específico total do forno podem ser visualizados em anexo VI.

gasosas realizadas pelo Centro tecnológico da cerâmica e do vidro (CTCV) num período de tempo mais alargado (2000 a 2009). Foi analisado o período de tempo que coincide com o início do funcionamento do forno e para este horizonte temporal foram recolhidas informações sobre os parâmetros de funcionamento da fábrica, nomeadamente, consumo de gás natural, incorporação de casco, teor e oxigénio no gás de exaustão.

A monitorização ambiental do NOx emitido no AV5 é feita na chaminé do forno, recorrendo a um aparelho de medição, o testo 350 XL. Com este é feito o registo da concentração do NO, NO₂ e NOx em ppm e da percentagem de oxigénio no gás, sendo depois corrigido o valor para mg/Nm³ e a 8 % de O₂, segundo a equação 1. Os valores registados pelo aparelho são obtidos já em base seca.

Os dados referentes às medições efectuadas na chaminé do forno AV5 englobam uma maior quantidade de informação no que respeita incorporação de casco, consumo de gás natural e teor de oxigénio no gás de exaustão. Com esta informação foram elaborados os gráficos apresentados nos resultados da análise das medições na chaminé.

Os valores aqui analisados correspondem a médias diárias, obtidas a partir dos registos que ao longo do dia, mais precisamente de duas em duas horas, os operadores vão anotando.

O facto de não ser possível saber exactamente o período do dia em que foi monitorizado o NOx, bem como o facto de se usar um período muito alargado nesta análise torna impossível determinar exactamente qual era o valor de parâmetros como o consumo de gás ou incorporação de casco, sendo por isto usados os valores médios diários para se proceder à análise. Evidentemente, seria mais correcto usar todos os valores medidos no mesmo período, contudo para isso seria necessário que esse registo fosse efectuado.

Esta análise surge como alternativa na tentativa de obter relações do tipo causa-efeito entre os parâmetros do processo que se considera interferirem significativamente nas emissões do NOx. A sua utilização surge pelo facto de representarem um período mais alargado do funcionamento do forno em estudo (2000 a 2009), juntamente com o facto de serem as medições oficiais executadas no âmbito do cumprimento dos valores limite de emissão apresentados na LA 98 de 2008 ^[11].

Nesta análise não foram avaliados parâmetros como o rácio ar/gás, bem como a temperatura do forno, uma vez que não constavam da informação fornecida.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos em cada uma das fases do trabalho. A informação que deu origem aos resultados apresentados é incluída nos Anexos (Anexo III, Tabela III-14 e III-15; Anexo V, Tabela V-16).

3.3 Resultados

Os resultados permitem avaliar eventuais relações existentes entre os parâmetros de operação do forno e a emissão de compostos de NOx.

3.3.1 Primeira Análise – Avaliação das emissões de NOx no pórtico do forno AV5

Em relação à primeira análise (*Avaliação das emissões de NOx no pórtico do forno AV5*) constata-se que com excepção da aparente relação entre o teor de oxigénio no gás de exaustão e a emissão de NOx, os resultados não indiciam existirem relações entre a emissão de NOx e os outros parâmetros, nomeadamente, a leitura óptica da temperatura, a temperatura da parede, a incorporação de casco, o rácio ar/gás e o consumo de gás natural.

Na base disto poderão estar a descontinuidade das medições de NOx no pórtico, a diferença na escala temporal entre os parâmetros de temperatura e incorporação de casco analisados e o NOx (os restantes são referentes ao momento da medição). Para além disso o funcionamento do forno pode estar a ser afectado por outros parâmetros aqui não analisados e por isso não é possível estabelecer relações causa-efeito.

Os resultados representam a variação da emissão do NOx em função dos parâmetros estudados, nomeadamente, rácio ar/gás, percentagem de oxigénio no gás de exaustão, incorporação de casco, consumo de gás natural, leitura óptica da temperatura e temperatura da parede final do forno, durante os anos de 2008 e 2009 recorrendo à informação tendo por base registos da fábrica para as medições monitorizadas no pórtico.

A informação em relação ao rácio ar/gás, percentagem de oxigénio no gás de exaustão e de caudal de gás, reflecte o período em que a medição foi efectuada. As temperaturas do forno e a incorporação de casco são valores médios diários registados no forno AV5 para o período em causa. As médias diárias são obtidas através dos registos anotados de duas em duas horas pelos operadores da fábrica.

A Figura 8 ilustra a evolução das emissões de NOx para o período aqui analisado.

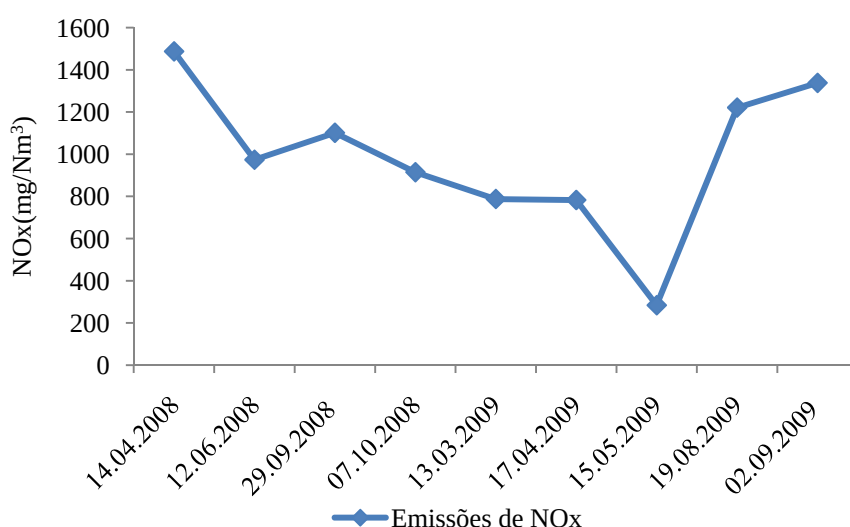


Figura 8 – Monitorização das emissões de NOx no pórtico (média da medição nos dois pórticos) do forno AV5 durante a produção de vidro verde-esmeralda

Verifica-se que de uma maneira geral, as emissões de NOx apresentam uma oscilação considerável ao longo do período analisado, variando entre um mínimo (284 mg/Nm³) e um máximo (1487 mg/Nm³). Ambos os valores são expressos em termos de NO₂, corrigidos a 8 % de O₂, e medidos em base seca.

De seguida serão apresentados os resultados relativos à relação entre os parâmetros (rácio ar/gás, percentagem de oxigénio no gas da exaustão, incorporação de casco, consumo de gás natural, tempertura do forno, analisada através da leitura óptica e temperatura da parede) e as emissões de NOx. Inicialmente é feita a análise dos parâmetros, sendo no fim apresentados todos os gráficos.

Outros parâmetros como a temperatura do vidro, a tiragem e o consumo de energia eléctrica (completado com o consumo específico total do forno) também registados na fábrica foram excluídos desta análise, passando para anexo, pois não demonstram

afectar significativamente os valores emitidos para o NOx, sendo a sua presença aqui dispensável (Anexo IV).

Em anexo é incluída a informação usada nos cálculos, assim como outros parâmetros considerados na avaliação de NOx (Anexo III, Tabela III-14 e Tabela III-15; Anexo IV).

Relação entre as emissões de NOx e o rácio ar/gás na combustão

Na Figura 10, observa-se que o rácio ar/gás varia entre 12 e 14, no entanto, o rácio de cerca de 13 é o mais usado normalmente para o AV5. A este valor corresponde um excesso de ar de cerca de 36 % (7,2 % de O₂), sendo o cálculo já anteriormente referido no capítulo 2 e apresentado no Anexo II.

Apesar de ser conhecida a relevância que a quantidade de ar introduzido no forno apresenta na emissão de NOx não é possível (pela Figura 10), visualizar a existência de uma relação entre o NOx e o rácio ar/gás.

Relação entre as emissões de NOx e a percentagem de O₂ no gás de exaustão

O facto de se trabalhar com excesso de oxigénio induz a que exista oxigénio no gás de exaustão. A Figura 11 mostra a relação entre as emissões de NOx e a percentagem de oxigénio no gás de exaustão durante as medições efectuadas no pórtico. De maneira geral, os dois parâmetros variam de modo similar indiciando a existência de uma relação significativa entre ambos. Nas medições aqui representadas, a percentagem de oxigénio oscilou entre um máximo de 3,32 % e um mínimo de 1,32 %.

O AV5, na produção de vidro VR, trabalha geralmente com 36 % ar e 7,2 % de O₂, estes são os valores que permitem registar, no caso do teor de oxigénio no gás de exaustão valores compreendidos entre 1 e 5 % ^[14].

A oxidação do azoto presente no ar de combustão a altas temperaturas é a principal origem de formação de NOx, sendo por isso importante controlar o teor de oxigénio na combustão de modo a não deixar que este seja demasiado elevado, por forma a controlar a formação do poluente ^[6].

Relação entre as emissões de NOx e a incorporação de casco

O casco de vidro é uma das principais matérias-primas usadas actualmente na produção de vidro verde-esmeralda. A sua incorporação é uma das medidas primárias de redução de NOx apresentadas pelo documento de referência contendo as melhores práticas aplicadas à indústria de produção de vidro.

Na Figura 12, verifica-se que a incorporação de casco oscilou entre os 50 a 70 %, registando-se os valores mais altos de incorporação mais recentemente. Pela Figura 12 não é possível estabelecer a relação esperada entre as emissões de NOx e a incorporação de casco. Em 2009, verifica-se mesmo casos em que se regista o aumento das emissões acompanhados pelo aumento de incorporação de casco, o que é um facto difícil de explicar mas pode estar associado a outras interferências no processo que não foram possíveis de apurar.

Relação entre as emissões de NOx e o consumo de gás natural

O gás natural é o principal combustível utilizado na fábrica. Na Figura 13 são relacionados os consumos de gás natural, aplicados durante a medição de NOx nos pórticos do forno AV5 no período analisado. O valor referente ao gás natural é anotado durante as monitorizações no pórtico, tendo sido possível verificar o valor associado à emissão de NOx.

Constata-se que o consumo específico de gás natural oscila entre um mínimo (850 kcal/kg) e um máximo (1048 kcal/kg) enquanto que as emissões de NOx registadas no pórtico variam numa gama entre 284 e 1487 mg/Nm³, corrigido a 8 % de O₂, medido em base seca e expresso em termos de NO₂. No Anexo III, Tabela III-15, são apresentados os dados de consumo de gás natural usado na elaboração da Figura 13.

Relação entre as emissões de NOx e a temperatura do forno

As temperaturas apresentadas (leitura óptica e da parede do forno) representam valores médios diários, calculados a partir dos registos realizados manualmente na fábrica ao longo do dia, sendo tipicamente registados dois valores dos parâmetros em cada duas horas.

A Figura 9 permite verificar que ambas as temperaturas evoluem no mesmo sentido, sendo visível a diferença entre estas (cerca de 80°C). A temperatura da parede é de cerca

de 1500°C e a temperatura resultante da leitura óptica é superior sendo de cerca de 1580°C. Segundo os registos da leitura óptica da temperatura os valores de operação do forno excedem o valor de referência sugerido no manual do forno (1550°C). A diferença entre a temperatura da parede e da leitura óptica deve-se ao facto de a primeira ser medida por um termopar que se encontra colocado na parede do forno, sendo este afectado pelo comprimento atingido pela chama. A leitura óptica dá-nos a temperatura ambiente do forno, gerada pela chama mas medida quando se dá a inversão.

A perda de temperatura registada no dia 15.05.2009 é mais acentuada na temperatura da parede (a diminuição é de 38°C face ao valor anterior) do que para a leitura óptica da temperatura (25°C face ao valor anterior).

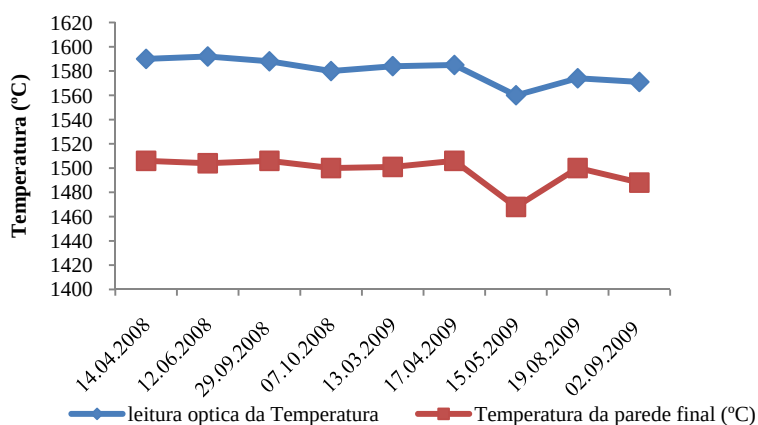


Figura 9 – Temperaturas registadas pela leitura óptica e da parede do forno AV5

A Figura 14 e 15 apresenta a evolução da formação de NOx em função das duas temperaturas pretendendo-se avaliar eventuais relações.

A Figura 14 indicia não haver relação entre a temperatura medida (leitura óptica) e a formação do NOx. O facto de esta temperatura se apresentar mais constante, bem como os aspectos de diferença de escala temporal e pontualidade das medições já anteriormente mencionados na análise não permitem concluir sobre a importância deste parâmetro na formação do NOx. É ainda possível observar que o valor da emissão mais baixa corresponde ao ponto para o qual a temperatura apresenta uma queda mais acentuada (25°C de queda da temperatura registado no dia 15.05.09), o que é um bom indício sobre a sua importância na formação do NOx.

A Figura 15 indicia a importância da temperatura da parede na emissão de NOx. Como referido, o valor da temperatura da parede do forno expressa uma média diária, enquanto que a emissão de NOx expressa um valor obtido durante uma medição pontual. A análise necessita de mais informação pormenorizada em relação aos valores da temperatura na altura da monitorização, no entanto estes foram os dados possíveis de analisar.

De seguida são apresentados os gráficos correspondentes aos parâmetros anteriormente mencionados.

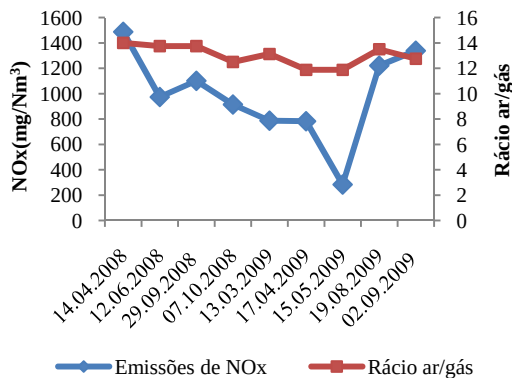


Figura 10 - Emissão de NOx e o rácio ar/gás registados no forno AV5

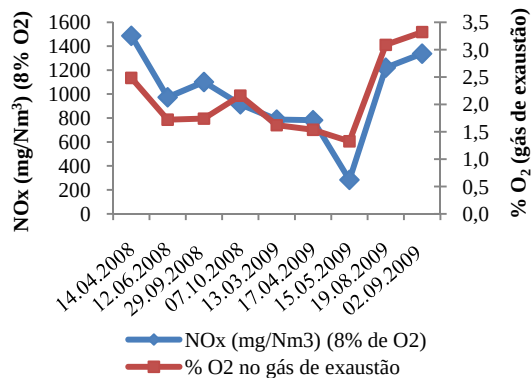


Figura 11 - Relação entre as emissões de NOx e a %O₂ no gás de exaustão

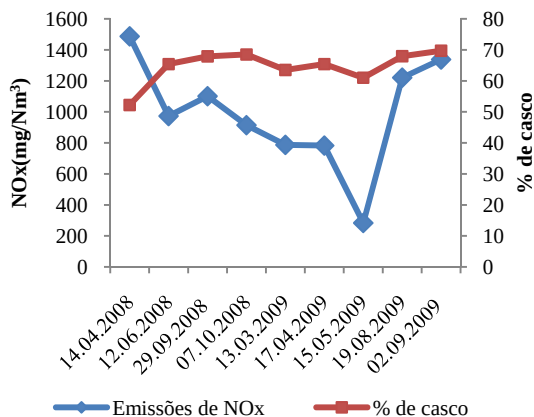


Figura 12 - Relação entre as emissões de NOx e o casco incorporado

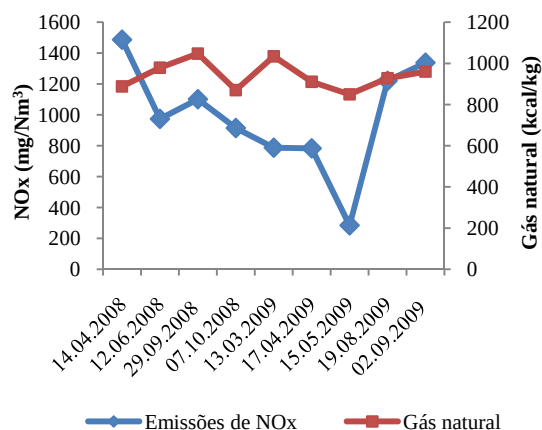


Figura 13 - Relação entre as emissões de NOx e o consumo de gás natural

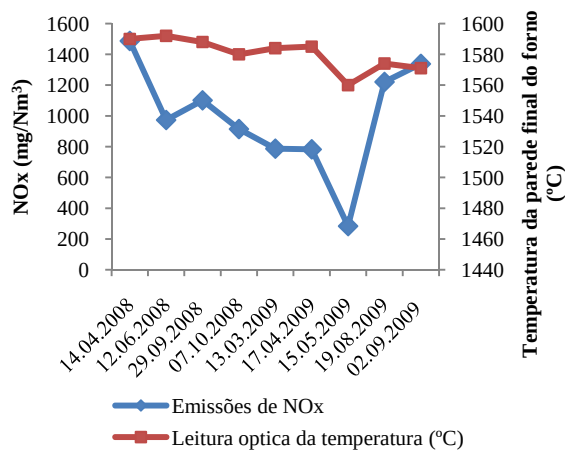


Figura 14 - Relação entre as emissões de NOx e a leitura óptica da temperatura

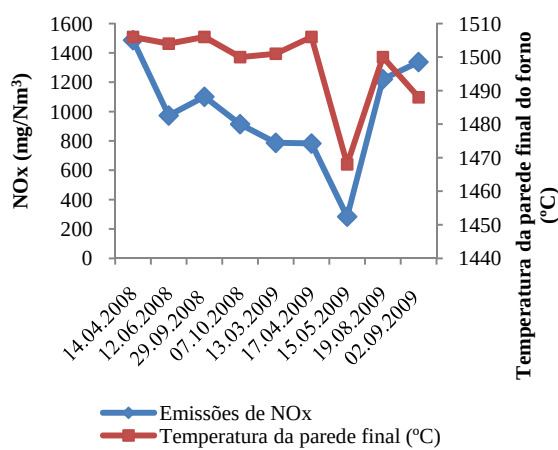


Figura 15 - Relação entre as emissões de NOx e a temperatura da parede final do forno

3.3.2 Segunda Análise – Avaliação das emissões de NOx na chaminé do forno AV5 determinadas pelo CTCV

Em relação à segunda análise (*Avaliação das emissões de NOx na chaminé do forno AV5 determinadas pelo CTCV*) apresenta-se a evolução das emissões de NOx no período analisado (2000 a 2009), bem como a relação entre a emissão de NOx e alguns parâmetros de operação do forno como, o teor de oxigénio no gás de exaustão, a incorporação de casco, o consumo de gás natural e a produtividade média diária.

É importante referir que a análise das emissões de NOx na chaminé foi possível uma vez que as monitorizações atmosféricas da fábrica são geralmente executadas durante a produção de vidro verde-esmeralda (VR).

As emissões de NOx registadas no forno AV5 têm vindo a diminuir ao longo dos anos. A visível redução na emissão do poluente é resultado de uma preocupação crescente com as emissões de NOx. O diploma legal (Portaria 286/2003) define 1500 mg/Nm³ corrigido a 8% de O₂, como valor limite de emissão (VLE) no período 2000 e 2008. Mais recentemente o valor foi reduzido para 1200 mg/Nm³, constando da licença ambiental da BA Avintes ^{[9], [10]}.

Os valores de emissão registados entre 2008 e 2009 são inferiores aos apresentados para anos anteriores.

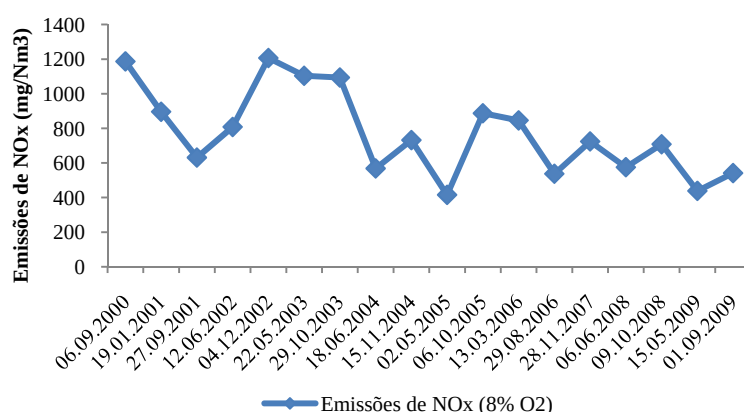


Figura 16 - Monitorização das emissões de NOx do forno AV5 pelo CTCV durante a produção de vidro verde-esmeralda no período 2000-2009

De seguida serão apresentados os resultados relativos à relação entre os parâmetros (teor de oxigénio no gás de exaustão, incorporação de casco, consumo de gás natural, produtividade diária) e as emissões de NOx. Inicialmente são analisados os parâmetros,

sendo depois apresentados os gráficos obtidos que relacionam os realacionam com as emissões de NOx. Resta referir que os valores apresentados para o NOx são resultado das monitorizações levadas a cabo pelo CTCV e em relação aos outros parâmetros são medias diarias registadas pelos operadores da fábrica.

Foi ainda analisado o consumo de electricidade do forno, tendo em conta os dados fornecidos, no entanto este parâmetro foi remetido para anexo (Anexo VI) pois não demonstram afectar significativamente os valores emitidos para o NOx.

Relação entre as emissões de NOx e o teor de oxigénio no gás de exaustão

Como seria de esperar existe uma relação aparente entre a emissão de NOx e a quantidade de oxigénio encontrado no gás de exaustão (Figura 17). Em linhas gerais verifica-se entre estes dois uma variação que segue o mesmo sentido, com excepção de apenas alguns casos (últimas medições registadas), onde a justificação poderá estar associada a alguma entrada de ar na chaminé que, no entanto, não contribuiu para a formação de NOx.

Relação entre as emissões de NOx e a incorporação de casco

Pode observar-se que ao longo do período analisado tem vindo a ocorrer um aumento na incorporação de casco e uma diminuição das emissões de NOx (Figura 18). Com esta relação, considera-se correcto concluir sobre a importância do casco no controlo das emissões de NOx. Salienta-se ainda que a partir de 2005 torna-se mais clara a relação evidenciada na Figura 18, onde é visível que o aumento na incorporação de casco é seguido por uma redução nas emissões NOx.

Relação entre as emissões de NOx e o consumo específico de gás natural

A relação entre o consumo específico de gás natural e as emissões de NOx (Figura 19) não é óbvia. Verifica-se que o consumo específico de gás natural tem estabilizado entre os 900 e os 1000 kcal/kg de vidro fundido.

Segundo o que foi possível averiguar, em 2003 foi realizada uma afinação dos queimadores instalados no forno, o que é evidenciado pelo gráfico uma vez que a primeira medição efectuada em 2004 foi bastante inferior. A afinação dos queimadores foi realizada pelos fornecedores destes, a Hotwork International e destinou-se a ajustar essencialmente os comprimentos da chama e a velocidade de saída do gás. Uma vez que o AV5 foi o primeiro forno a trabalhar com gás natural, esta afinação teve também um

intuito de informar melhor os trabalhadores da empresa sobre o seu modo de funcionamento. Desta forma, parece coerente que após esta afinação se verifique melhores resultados em termos de emissões de NOx originados por um melhor funcionamento dos queimadores de baixo-NOx.

Entre 2004 e 2005 é visível uma variação discordante entre o consumo de gás natural e as emissões de NOx. Neste período o consumo de gás natural aumenta, atingindo o valor máximo (1106 kcal/kg), por sua vez as emissões de NOx baixam consideravelmente para valores de 415 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂. Este facto, embora não tendo sido possível apurar devidamente, pode estar relacionado com a colocação e arranque do filtro electrostático, nomeadamente devido a problemas se controlo do consumo uma vez que se tratava de uma situação nova para a fábrica.

De seguida serão apresentados os gráficos referentes aos parâmetros anteriormente mencionados.

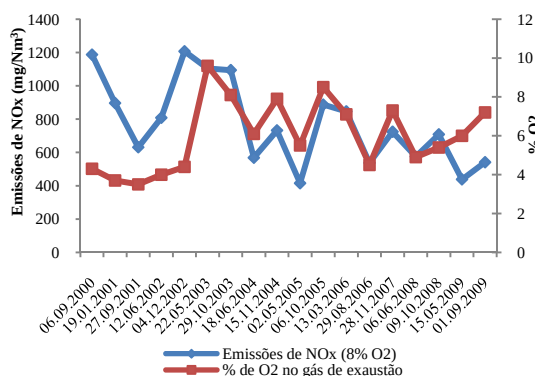


Figura 17 - Relação entre as emissões de NOx e a %O₂ na chaminé

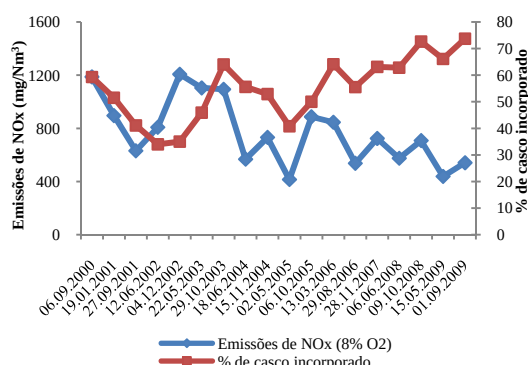


Figura 18 – Relação entre as emissões de NOx e incorporação de casco

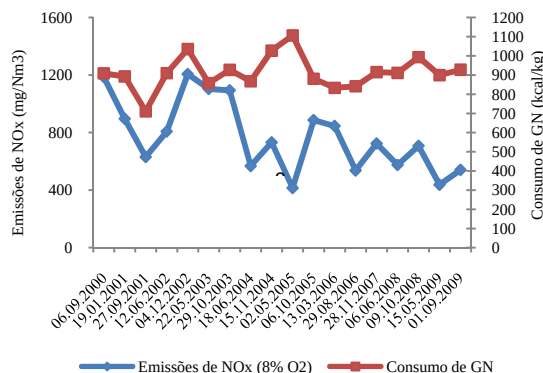


Figura 19 – Relação entre as emissões de NOx e o consumo de gás natural (GN)

A interferência de outras variáveis do processo é outra hipótese que pode fazer com que não seja visível a relação entre os parâmetros. De facto, tratando-se do funcionamento de um forno podem existir inúmeras razões de ordem prática que podem levar a um aumento do consumo de gás, como por exemplo o aparecimento de espuma no leito de fusão ou o aparecimento de infundidos nas garrafas (pedra). Estes são dados impossíveis de verificar para a análise apresentada mas que podem ajudar a compreender melhor o resultado obtido.

Entre as duas análises anteriores existe um dia comum, 15 de Maio de 2009, para o qual o valor de NOx na chaminé foi de 438 mg/Nm³ (corrigido a 8% de O₂) e no pórtico foi de 284 mg/Nm³ (corrigido a 8% de O₂). A diferença entre os valores é de 154 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂. Salienta-se que não foi possível comparar outros de emissões de NOx medidos na chaminé e pórtico pois apenas no dia referido anteriormente (15.05.2009) estes dois valores foram monitorizados simultaneamente.

3.4 Conclusões

As conclusões vão ser apresentadas separadamente, para as duas fases de trabalho.

A partir da primeira análise conclui-se sobre a relação entre o teor de oxigénio e a emissão de NOx, sendo que, tipicamente, quando um aumenta o outro também.

Com a segunda análise foi possível demonstrar a relação entre o poluente em estudo, o teor de oxigénio e a incorporação de casco, o que permitiu concluir sobre a importância destes nas emissões de NOx. A emissão aumenta para valores de oxigénio superiores e diminui com o aumento da incorporação de casco.

A diferença de resultados obtidos entre as análises às emissões de NOx no pórtico e na chaminé do forno AV5 parece justificar-se pelo facto de nesta última estar representado quase todo período de funcionamento do AV5.

Apesar de o valor de emissão de NOx medido na chaminé ser superior ao valor medido no pórtico, não se retiram conclusões mais genéricas da relação entre estes dois valores devido ao facto de isto ter sido verificado apenas para uma única medição.

3.4.1 Primeira Análise – Avaliação das emissões de NOx no pórtico do forno AV5

A gama de variação do NOx medido foi de 284 mg/Nm³ e 1487 mg/Nm³, ambos corrigidos a 8% de O₂ e medidos em base seca.

Não foi possível estabelecer as relações entre a emissão de NOx e alguns dos parâmetros analisados, nomeadamente o consumo de gás natural, o rácio ar/gás, a incorporação de casco e a temperatura da parede final do forno.

O teor de oxigénio no gás de exaustão foi o parâmetro que evidenciou a tendência esperada, sendo que quando o oxigénio aumenta o NOx também. A relação foi demonstrada pelo facto de o teor de oxigénio no gás de exaustão ser um dos parâmetros registados conjuntamente com as medições do NOx, contrariamente ao que se verifica para os outros parâmetros, em que os valores expressam médias diárias. Este resultado é esperado tendo em conta que quanto maior a quantidade de oxigénio disponível, maior será a formação de NOx térmico.

No caso do consumo de gás, apesar de ser representado o valor fixo ao qual foi efectuada a medição, não foi possível estabelecer a relação esperada com o NOx. A justificação que se mostrou mais provável para tal acontecimento assenta no facto de existirem outros factores que, simultaneamente, afectam a formação do poluente, como a temperatura, ou mesmos outros aspectos práticos de funcionamento do forno que não foram abordados com o pormenor exigido, como é o caso da chama e da distribuição do gás pelos quatro queimadores, que se sabe afectarem a formação do NOx.

O mesmo acontece para o rácio ar/gás, ou seja, foi aqui apresentado o valor no qual foi efectuada a medição contudo não se percebe uma relação com o NOx, o que se deve provavelmente a interferências de outros parâmetros e à descontinuidade entre as medições.

Para os restantes parâmetros (incorporação de casco, temperatura da parede forno), a razão pela qual se pensa não ter sido possível estabelecer relações assenta também no facto de haver um espaço temporal considerável entre medições e ainda por estes representarem valores médios diários.

A incorporação de casco no forno vai depender essencialmente da sua qualidade, no que respeita à existência de contaminantes e à sua disponibilidade.

A análise conseguida com as temperaturas do forno não foi, como seria de espera, conclusiva em relação ao NOx.

Conclui-se que a descontinuidade entre as medições, a diferença de tempo em que alguns dos parâmetros foram registados por comparação com os registos das emissões de NOx, e a interferência que alguns outros parâmetros não avaliados (chama, queimadores de baixo-NOx) possam ter no funcionamento do forno sejam o motivo pelo qual não se consegue estabelecer uma relação entre o rácio ar/gás e a emissão de NOx.

Realça-se ainda o facto de ser importante ter uma visão global do forno, sendo neste caso essencial avaliar a variação no mesmo instante para cada um dos parâmetros avaliados para se poder descrever com maior pormenor o modo de operação do forno e relacionar os parâmetros de funcionamento com as emissões de NOx.

3.4.2 Segunda Análise – Avaliação das emissões de NOx na chaminé do forno AV5 determinadas pelo CTCV

Conclui-se que as emissões obtidas durante as monitorizações ambientais são inferiores ao valor limite de emissão definido pela licença ambiental da BA Avintes (1200 mg/Nm³ para 8% de O₂, medido em base seca).

A gama de variação do NOx medido foi de 415 mg/Nm³ e 1207 mg/Nm³, ambos corrigidos a 8% de O₂ e medidos em base seca.

Conclui-se ainda que ao aumento de casco de vidro usado na fusão, ao longo do período de análise, está associada uma diminuição de emissão de NOx. De igual modo, estabelece-se uma relação entre a percentagem de oxigénio no gás de exaustão e a concentração de poluente. Constata-se também que, salvo algumas excepções, o aumento do teor de oxigénio no gás de exaustão é acompanhado por um aumento da emissão de NOx.

Relativamente ao consumo de gás natural não foi evidenciada a tendência esperada, conclui-se que, em particular após 2005, o consumo específico de gás natural se mantém aproximadamente constante, enquanto que as emissões de NOx diminuem.

Tal como na primeira análise, também aqui houve o problema da escala temporal dos parâmetros, ou seja, se por um lado os parâmetros se referem a valores médios diários, obtidos através dos registos horários manuais dos operadores da fábrica, por outro as medições são obtidas num determinado período do dia, levando isso ao desfasamento temporal acima referido. Importa referir que apenas os valores médios diários são introduzidos no computador, não tendo sido por isto apresentada a sua oscilação diária.

Capítulo 4 – Análise das condições de operação do forno AV5: Consumo energético, produtividade diária, incorporação de casco

Resumo

Esta análise surge após se ter comprovado a evolução divergente entre a incorporação de casco e as emissões de NOx e tem por objectivo analisar e concluir sobre qual será o menor consumo energético específico do forno para condições de funcionamento deste tendo em consideração a produtividade e a quantidade de casco de vidro incorporado.

É analisada a relação existente entre o consumo específico de gás natural e ajuda eléctrica, a produtividade diária (tiragem) tomando em consideração diferentes percentagens de incorporação de casco de vidro na fusão para o forno AV5.

Esta análise foi conseguida através de uma metodologia que se serviu do programa computacional Excel.

A metodologia aqui apresentada consiste em separar os dados quanto à incorporação de casco e produtividade diária, calculando para cada situação a média do consumo específico do forno. Os dados aqui analisados referem-se a valores médios diários para o período entre 2005 e Fevereiro de 2010.

Como principais resultados deste capítulo destaca-se que o melhor consumo do forno se refere a uma produtividade de 365-369 t/dia, para 70-74% de casco incorporado, sendo o consumo de 896 kcal/kg. A pior solução encontrada refere-se a um consumo de 1136 kcal/kg, conseguido para uma produtividade de 255-259 t/dia e uma incorporação de 40-44% de casco.

Conclui-se, como era de esperar, que a incorporação de casco conduz a uma maior redução nos consumos do forno, sendo que no presente caso a melhor situação apresenta-se para uma tiragem próxima da nominal do forno para uma incorporação de casco elevada.

4.1 Introdução

Partindo do conceito de que o aumento da incorporação de casco permite reduções no consumo do forno, foram recolhidos dados sobre a tiragem, o consumo energético total, bem como a percentagem de casco incorporado neste.

A análise aqui apresentada visa demonstrar que o consumo específico do AV5 decresce à medida que a produtividade do forno aumenta, sendo a diminuição mais acentuada para maiores incorporações de casco.

4.2 Descrição da metodologia

A análise tomou em consideração os valores de consumo específico de energia (gás natural e ajuda eléctrica), tiragem e incorporação de casco para o vidro verde-esmeralda (VR) durante o período de 2005 a Fevereiro de 2010 (Anexo VII, Tabela VII-17). Mais uma vez, a escolha deste período teve por base a maior estabilidade que o forno aparenta após o ano de 2005.

Inicialmente, procedeu-se ao tratamento dos dados recebidos, de forma a obter apenas aqueles relativos à produção de vidro VR no AV5.

Com os valores de tiragem, consumo de gás natural, energia eléctrica e incorporação de casco de vidro do AV5 para o vidro VR procedeu-se à análise pretendida. Com vista a atingir o objectivo, foi aplicado o seguinte procedimento:

- I. Inicialmente foi necessário calcular o consumo específico do forno com base nos valores de consumo de gás natural e electricidade⁵;
- II. Os valores da produtividade bem como da incorporação de casco foram transformados em valores inteiros múltiplos de 5, isto através de uma função Excel. Esta função permitiu agrupar os valores por gama, com intervalos de 5. A aplicação da função inteiro e múltiplo de cinco originou uma separação dos

⁵ O cálculo do consumo específico (em kcal/kg) de gás natural e electricidade foi conseguido através das fórmulas apresentadas no anexo III, sendo o consumo total a soma dos dois componentes (gás natural e electricidade).

dados em gama do 30-34, 35-39 até 70-74 para a incorporação de casco e do tipo 255-259, 250-264 até 385-389 para a produtividade diária do forno.⁶

III. A opção tabela dinâmica apresentada no programa Excel permitiu apresentar os dados tratados anteriormente. No final, os dados são agrupados e é apresentada a média do consumo específico obtida para a produtividade diária e incorporação de casco correspondente. Analisando a Tabela 6, é possível observar uma coluna/linha intitulada por Média. Na coluna final apresenta-se a média total (considerando todas as produtividades) para cada uma das produtividades apresentadas. A linha final, representa (considerando todas a produtividades) a média total para cada uma das gamas de incorporação de casco consideradas.

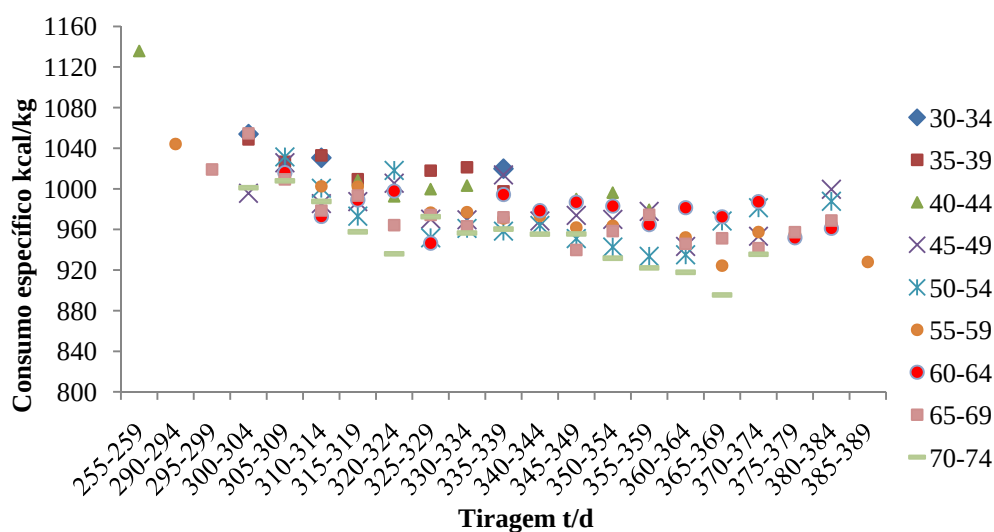
IV. Com a Tabela 6 foi possível construir o gráfico apresentado na Figura 20, onde se ilustra a evolução do consumo total do forno em função da tiragem, para diferentes incorporações de casco.

⁶ Ao aplicar a função Inteiro do Excel os dados são avaliados sem casas decimais, ou seja, esta função em conjunto com a função múltiplo de 5 considera o valor 344,99 como sendo 340 e 339,99 como sendo 335.

Tabela 6 – Consumos específicos médios (Kcal / kg de vidro VR) para várias produtividades e incorporações de casco. Valores registados no período 2005 a Fevereiro de 2010

Consumos específicos médios	% Casco									Média
	30 - 34	35 - 39	40 - 44	45 - 49	50 - 54	55 - 59	60 - 64	65 - 69	70 - 74	
Tiragem										
255 – 259			1136							1136
290 – 294						1044				1044
295 – 299								1019		1019
300 – 304	1054	1050		996				1055	1001	1039
305 – 309		1027		1026	1031	1011	1016	1009	1008	1017
310 – 314	1031	1033		985	1001	1002	973	979	988	1008
315 – 319		1010	1008	987	973	1002	989	993	958	988
320 – 324			993	1006	1018		998	964	936,	991
325 – 329		1018	1000	970	952	977	947	974	973	976
330 – 334		1021	1003	970	961	977		963	957	978
335 – 339	1020	998		1014	958	971	994	972	960	973
340 – 344				968	964	973	979		955	968
345 – 349			990	974	951	962	987	940	956	961
350 – 354			996	970	943	964	983	958	932	955
355 – 359			979	978	933	966	965	974	922	949
360 – 364				943	935	952	981	946	918	948
365 – 369					968	924	972	951	896	948
370 – 374				953	981	958	987	942	936	950
375 – 379						956	952	957		955
380 – 384				1000	988	965	961	969		976
385 – 389						928				928
Média	1037	1023	1005	982	955	965	983	964	953	969,

A partir da Tabela 6 foram obtidos as Figuras 20 e 21, onde se descreve a evolução dos consumos bem como a melhor solução aqui encontrada.

**Figura 20 – Consumo específicos médios de energia em função da produtividade diária e para diferentes percentagens de casco incorporado**

Conclui-se que há uma diminuição do consumo específico do forno com o aumento da tiragem, o que se verifica para a generalidade das percentagens de casco incorporado. Os valores de consumo específico variam entre um mínimo de 896 kcal/kg, obtido para uma produtividade entre 365-369 t/dia e considerando a incorporação de 70-74% de casco de vidro e um máximo de 1136 kcal/kg obtido para uma tiragem de 255-259 t/dia e uma incorporação de 40-44 % de casco.

Fixando a produtividade de 320-324 t/dia é possível observar a diminuição do consumo específico do forno com o aumento da incorporação de casco, principalmente para as incorporações de 60-64%, 65-69% e 70-74%.

Na prática, este gráfico pode servir de base no controlo do forno na medida em que serve de referência ao operador, isto é, no caso de se estar a trabalhar com a mesma incorporação de casco e produtividade é observado se o forno está a operar com um consumo inferior ou superior ao do gráfico, avaliando-se assim a eficiência da operação.

O valor mínimo de consumo específico aqui encontrado corresponde à melhor solução de consumo do forno, enquanto que o máximo se refere à pior situação de consumo. Estes resultados estão ilustrados na Figura 21, onde a vermelho se encontra a pior situação de operação do forno e a azul é assinalada a melhor situação de consumo.

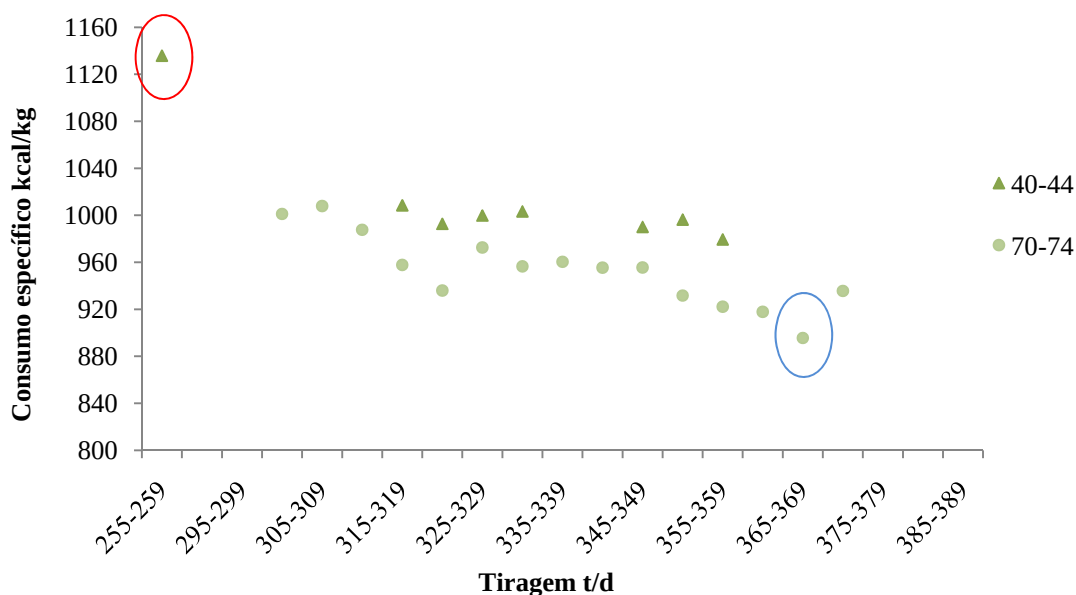


Figura 21 – Evolução do consumo específico em função da tiragem para 70% de casco incorporado

A Figura 21 ilustra a evolução das linhas de casco onde foi possível encontrar a melhor e pior solução de consumo do AV5.

O que se esperava na evolução dos consumos específicos em função da tiragem é que este diminuísse com o aumento da produtividade. Contudo, isto não foi verificado para todas as situações, sendo visível em alguns casos um aumento no consumo acompanhado com o aumento da produtividade.

As razões para as variações crescentes no consumo não foram possíveis de averiguar aqui, no entanto pensa-se que podem estar relacionadas com necessidades de aumentar o consumo devido a algum problema na produção, sendo exemplo disso a existência de contaminantes na mistura ou o aparecimento de defeitos na garrafa (exemplo: bolha ou murça).

Outra razão que se pode apresentar, mas se considera menos provável é a existência de erros nos registos dos valores relativos aos consumos de gás natural e electricidade. O valor médio diário usado é conseguido a partir de registos diários manuais, ou seja, de duas em duas horas o operador de serviço regista dois valores, para o consumo de gás natural, electricidade e incorporação de casco e estes valores registados de duas em duas são (no final do dia) usados para calcular o valor médio diário.

A análise dos valores apresentados anteriormente foi precedida de uma análise que considerou o período total de vida do forno, ou seja, desde 2000 até 2010. O resultado obtido reflecte uma maior instabilidade no funcionamento do forno entre 2000 e 2005 (Anexo VIII). Tal resultado apoia a conclusão já anteriormente obtida sobre o melhor funcionamento verificado no AV5 a partir de 2005.

O facto de este ter sido o primeiro forno a operar com gás natural, juntamente com a colocação do filtro electrostático em 2003 podem estar na origem desta fase menos estável do forno.

No âmbito do estudo da importância do casco na redução dos consumos bem com da solução ideal de consumo do forno foi realizada uma análise, considerado como um exercício académico onde se aplica o mesmo procedimento aqui apresentado, sendo este conseguido manualmente, sem recorrer à função do Excel tabela dinâmica. Esta análise encontra-se descrita no anexo (Anexo IX).

4.3 Conclusão

Conclui-se aqui que existe uma diminuição do consumo de específico de energia do forno para um aumento da produtividade média diária e da incorporação de casco de vidro.

A melhor condição de funcionamento do forno à qual está associada o menor consumo energético (896 kcal/kg), é registada para uma produtividade de 365-369 t./dia e uma incorporação de casco de 70-74%. A situação de funcionamento menos eficiente à qual está associado um consumo específico de 1136 kcal/kg, verifica-se para uma produtividade de 255-259 t/dia e uma incorporação de casco de 40-44%.

Um exemplo do que seria de esperar é verificado para a produtividade de 320-324 t/dia. Para esta gama de valores observar-se que o aumento da incorporação de casco conduz à redução do consumo específico do forno, principalmente verificado para as incorporações de 60-64%, 65-69% e 70-74%.

A melhor solução, em termos de consumo específico refere-se à maior incorporação de casco observada, o que realça a importância da sua incorporação. A pior condição de funcionamento do forno ao nível do consumo específico é verificada para uma incorporação de casco, comparativamente, mais baixa (40-44%).

Capítulo 5 - Monitorização das emissões de NOx na chaminé e no pórtilco: descrição e análise da medição

Resumo

Este capítulo tem por objectivo descrever e analisar a última monitorização das emissões gasosas realizada ao forno AV5, incidindo na análise das emissões de NOx verificadas no pórtilco e chaminé do forno.

A monitorização das emissões gasosas é essencial para que uma fábrica possa avaliar e controlar com a legislação ambiental vigente as emissões gasosas dos poluentes produzidos na instalação.

Assim, respeitando a licença ambiental da fábrica (LA 96 de 2008), duas vezes por ano civil, e com um intervalo mínimo de dois meses, a BA Avintes convoca o Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV) para que este faça a recolha e análise de todas as emissões da fábrica, nomeadamente dos cloretos, fluoretos, metais pesados, partículas, óxidos de azoto, dióxido e monóxido de carbono, oxigénio e dióxido de enxofre. São também monitorizadas a temperatura, pressão, velocidade, caudal e ainda a humidade dos gases.

Neste capítulo descreve-se a metodologia usada pelo CTCV durante a monitorização das emissões gasosas na chaminé do AV5, que decorreu no dia 3 de Junho.

É descrita a toma de amostragem, o método de ensaio, as condições de operação do forno AV5 durante a caracterização. É também descrito o acompanhamento da caracterização pelos operadores da fábrica no que respeita à monitorização no pórtilco e vários parâmetros de operação do forno.

Por último são apresentados os resultados obtidos em relação a às emissões de NOx registadas tanto na chaminé como no pórtilco, sendo esta de 618 mg/Nm³ corrigida a 8% de O₂ medida na chaminé

A respeito da formação de poluente, foi possível concluir que as emissões de NOx se encontram abaixo do VLE. Foi ainda possível concluir sobre a importância de parâmetros como o consumo de gás natural, rácio ar/gás e temperatura da parede na redução do poluente.

5.1 Descrição da metodologia usada

O CTCV é uma instituição de utilidade pública, que visa promover o desenvolvimento tanto de sector cerâmico como do vidro. Encontra-se certificado pela APCER (Associação Portuguesa de Certificação, organismo acreditado pelo Instituto Português da Qualidade), nos termos da NP EN ISO 9001, sendo ainda uma entidade acreditada pelo Instituto Português de Acreditação (IPAC). O CTCV realiza a monitorização e todos os ensaios necessários para determinação das emissões atmosféricas originadas pela actividade da fábrica ^[24].

A monitorização atmosférica realizada pelo Centro tecnológico da cerâmica e do vidro (CTCV) é feita na chaminé do AV5, sendo acompanhada pelos operadores da fábrica, que fazem o controlo da queima no pórtilco.

Em seguida é descrita a metodologia seguida para determinação do NOx pelo CTCV e internamente pela BA Avintes.

A amostragem e determinação dos óxidos de azoto são feitas por um método automático, sendo no caso do CTCV usado um equipamento designado por Testo 350 XL (nº série 00736515). Cada amostragem efectuada pelo CTCV deve decorrer por um período superior a 30 min de modo a conseguir englobar os dois ciclos de queima.

No controlo efectuado no pórtilco, o processo foi acompanhado com um aparelho muito semelhante designado por testo 300. Neste caso a medição é efectuada em cada um dos dois pórtilcos do forno, também para englobar os dois ciclos de queima. Ambos aparelhos de amostragem permitem obter resultados em base seca.



Figura 22 – Exemplo de um Testo 350 XL



Figura 23 – Exemplo de um Testo 300

A medição de óxidos de azoto na chaminé do forno AV5 segue a ISO 10396:1998 e ISO 10849:1996.

A toma de amostragem cumpre com os requisitos da norma NP 2167:2007, em relação às dimensões e características, nomeadamente da plataforma e tomas de amostragem existentes na chaminé do forno ^[24]. No caso do AV5 (Figura 24), a chaminé possui 50 metros de altura, sendo a monitorização atmosférica realizada na plataforma a 33,2m de altura (Figura 25). A chaminé possui quatro tomas de amostragem, desfasadas de 90°, sendo a amostragem realizada em duas delas, com esse desfasamento.



Figura 24 – Chaminé do forno AV5

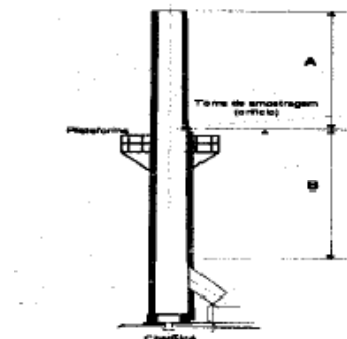


Figura 25 - Chaminé do forno AV5, localização da plataforma de amostragem

O número de tomas cumpre com o apresentado na norma, uma vez que a chaminé possui um diâmetro de 2,20 m, sendo requisito da norma, para chaminés com diâmetro superior a 0,35 m a existência de duas tomas ^[25].

O aparelho usado na medição foi calibrado antes de cada ensaio. O procedimento consiste em deixar a sonda a recolher o ar atmosférico até atingir 21% de O₂ e 0 ppm de NO_x. Em seguida foram recolhidas amostras em duas tomas de amostragem. Os resultados para a monitorização do NO_x são apresentados tendo em conta a média dos valores medidos com o Testo 350 XL, corrigido (8% de O₂) e apresentado em mg/Nm³, expresso em termos de NO₂. O cálculo foi efectuado segundo a equação 1 apresentada anteriormente no capítulo 3.

Devido à existência de interferências verificadas durante a monitorização, são apresentados em seguida os parâmetros associados a dois ensaios efectuados, nomeadamente no que diz respeito à produtividade diária, incorporação de casco,

consumo energético, rácio ar/gás, temperatura da parede e do vidro, abertura da válvula de diluição, e pressão do forno. É ainda descrita a distribuição do gás natural pelos queimadores para os dois ensaios realizados.

5.2 Análise dos resultados

5.2.1 Condições de operação do forno

Na Tabela 7 estão registadas as condições de operação do forno durante os dois ensaios, realizados para uma produtividade média diária de 325 t/dia.

Tabela 7 – Condições do forno registadas nos dois ensaios

<i>Parâmetro</i>	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>
Tiragem (t/dia)	325	325
% de casco	62,2	62,2
Consumo específico (kcal/kg)	968,3	764,9
Gás Natural (kcal/kg)	1021	1006
Ajuda Eléctrica (kcal/kg)	13	64
Rácio ar/gás	12,8	10,98
Temperatura de Parede (°C)	1500,2	1471,6
Temperatura do Vidro (°C)	1252,3	1251,8
Pressão (mmH ₂ O)	0,948	1,06
Válvula de Diluição (%)	100	5,5

O primeiro ensaio representa a situação inicial de funcionamento do forno AV5, na produção de vidro verde-esmeralda, enquanto que o segundo ensaio reflecte o resultado após alguns acertos aos parâmetros de funcionamento.

Os parâmetros associados às condições de funcionamento do forno são assinalados de seguida.

O consumo de gás natural foi reduzido de 1021 para 1006 kcal/kg, tendo sido aumentada a ajuda eléctrica de 13 para 63 kcal/kg. Este aumento deve-se à necessidade de controlar melhor a temperatura do vidro uma vez que a temperatura da parede diminui. Ao aumentar-se a temperatura do fundo, tenta-se manter a temperatura do

vidro o mais constante possível de modo a evitar alterações que possam causar defeitos de qualidade no vidro.

A válvula de diluição está totalmente aberta, procedimento habitual da fábrica, e que tem como objectivo fazer o arrefecimento do gás de exaustão antes da sua passagem pelo filtro (deve estar a entre 300 e 550 °C), caso contrário, o gás iria entrar a temperaturas mais elevadas, causando problemas no funcionamento do filtro. No segundo ensaio, a abertura da válvula de diluição passou de 100 para 5,5% esta medida serviu de controlo ao teor de oxigénio do gás de exaustão que estaria muito elevado.

A diminuição do gás natural, bem como do rácio ar/gás tornam a combustão mais redutora.

Para além das condições de funcionamento do forno, é importante avaliar a distribuição do gás natural pelos queimadores do forno, uma vez que este pode afectar a formação da chama dentro do forno através da velocidade e do caudal de gás injectado. Neste caso foi apenas registada a distribuição dos caudais, no entanto sabe-se que quanto maior o caudal maior a velocidade com que este é injectado. Também o posicionamento do queimador é um parâmetro importante uma vez que vai influenciar a formação da chama em U dentro do forno.

Desta forma, foi feito o registo da distribuição do caudal de gás pelos quatro queimadores em funcionamento. Neste caso, sabe-se que os queimadores devem apresentar um ângulo vertical de colocação entre 5 e 10°, sendo este decrescente do queimador mais próximo à parede lateral do forno (exterior) para o queimador mais próximo do meio do forno (interior). Outra condição relativa à distribuição dos caudais é que esta deve ser o mais semelhante possível para ambos os lados da queima de forma a favorecer uma queima simétrica.

Em consequência do referido anteriormente, foi feito o registo da distribuição dos caudais de gás para ambos os ensaios, sendo ainda apresentada informação referente ao posicionamento destes. Esta informação foi obtida no dia 26 de Maio de 2010, e não no dia da monitorização (2 de Junho), contudo estes não foram alterados, sendo por isso válida.

Na Tabela 8 pode observar-se os caudais apresentados pelos queimadores no início da caracterização (1º ensaio), bem como no segundo ensaio.

Tabela 8 – Caudais registados inicialmente para os queimadores de baixo NOx

	Queimadores	Queima do lado direito	Queima do lado esquerdo
		Caudal (Nm ³ /h)	Caudal (Nm ³ /h)
<i>1º Ensaio</i>	(Exterior) 1	500	500
	2	480	490
	3	300	280
	(Interior) 4	180	200
<i>2º Ensaio</i>	(Exterior) 1	400	400
	2	380	390
	3	240	220
	(Interior) 4	140	160

Como se pode observar, entre o 1º e o 2º ensaio houve uma redução no caudal de gás distribuído pelos queimadores, coerente com a redução do gás natural efectuada.

A diminuição do caudal de gás natural leva a uma menor velocidade de injeção de gás, o que origina chamas menos turbulentas, favorecendo a redução do NOx, uma vez que quanto maior a turbulência da chama maior o contacto desta com o ar envolvente e maior será a formação de NOx.

Em relação aos valores da Tabela 8 é possível referir que, para ambos os ensaios, a distribuição dos caudais é semelhante de ambos os lados da queima. Este facto vai de encontro ao conceito de proporcionar uma queima simétrica desejado no funcionamento do forno. Quando o caudal de gás natural é alterado (2º ensaio), a distribuição dos queimadores também foi alterada, sendo por isso necessário voltar a tomar nota dos valores. A distribuição do gás continuou semelhante em ambos os lados dos queimadores, contudo diminuiu bastante relativamente ao ensaio anterior.

Outro aspecto possível de observar é a diminuição dos caudais do exterior para o interior, o que é um indicador de favorecimento do U dentro do forno.

Para determinar se o posicionamento dos queimadores estaria dentro dos limites indicados no manual da fusão da fábrica, foi necessário medi-los com recurso a um medidor de ângulos, sendo o resultado obtido apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Ângulo vertical de posicionamento dos queimadores

Número do queimador	<i>Ângulo vertical dos queimadores (°)</i>	
	<i>Lado esquerdo</i>	<i>Lado direito</i>
(exterior) 1	10	9
2	10	9
3	9	8
(interior) 4	9	8

Analisando o posicionamento dos queimadores, é visível que existe um desfasamento de 1° entre os lados da queima e que o decréscimo entre o queimador exterior e interior não é gradual, no entanto ambos estão dentro dos limites indicados no manual da fusão da fábrica (5 a 10°) e apresentam uma diminuição no ângulo entre o queimador exterior e interior, cumprindo as especificações ^[14].

5.2.2 Monitorização do NO_x no pórtico

A caracterização das emissões gasosas é acompanhada através de um controlo efectuado no pórtico, recorrendo a um aparelho de medição (testo 300) semelhante ao usado na medição na chaminé (Figura 26).

A monitorização no pórtico é realizada em simultâneo com a caracterização na chaminé. A Figura 26 mostra o local de medição no forno. O local assinalado pretende evidenciar o ponto onde é introduzido o equipamento de medição de alguns poluentes desta zona do forno como o caso do NO_x e do CO. Este controlo é essencial para verificar o excesso de oxigénio na queima, sendo que ao observar o teor de oxigénio no gás de exaustão, juntamente com a formação de CO consegue avaliar-se se a queima esta a ser completa ou não.

Também aqui é necessário fazer-se a calibração do instrumento, deixando a sonda aspirar ar atmosférico para obter 21% de O₂ e 0 ppm de NO_x. Após calibração a sonda é introduzida numa mangueira, cujo material é um polímero e que encaixa numa cana de material refractário que é introduzida no pórtico, fazendo a recolha do gás de exaustão. Este processo é diferente do utilizado pelo CTCV pois, devido à temperatura do forno, introduzir a sonda directamente levaria a um desgaste muito rápido o aparelho.

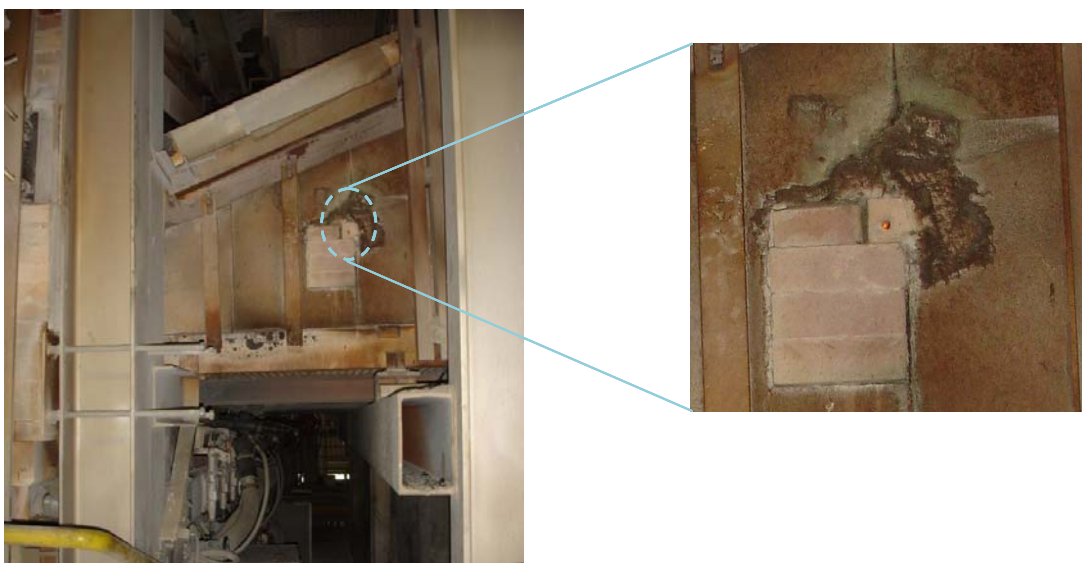


Figura 26 – Pórtico esquerdo do forno AV5

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para os óxidos de azoto (NOx), monóxido de carbono (CO) e oxigénio (O₂) para ambos os ensaios e para os dois locais onde a monitorização no pórtico é realizada (esquerda e direita correspondente ao local onde estão situado os queimadoras no forno).

Realça-se que para os dois ensaios são disponibilizados os valores monitorizados nos pórticos (lado direito e esquerdo).

Tabela 10 – Emissões gasosas registadas nas medições no pórtico pelo 1º e 2º ensaios

		% O ₂	CO (ppm)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	NO _x (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³ , 8 % O ₂)	Rácio ar/gás
1º ensaio	Queima Direita	2,75	135,69	736,10	36,81	772,92	1587,24	1106,80	13
	Queima Esquerda	2,50	74,10	800,77	41,15	841,92	1728,94	1216,80	12,6
	Média	2,42	104,90	768,44	38,98	807,42	1658,09	1162	
2º ensaio	Queima Direita	1,27	992,63	367,76	18,40	386,18	792,84	522,97	11,1
	Queima Esquerda	1,04	2183,08	454,13	18,63	472,75	970,56	633,05	11,6
	Média	1,16	1587,86	410,94	18,53	429,47	881,70	578	

Conclui-se que as condições referentes ao segundo ensaio permitem reduzir as emissões de NOx. Desta forma, comprova-se experimentalmente a importância de parâmetros como o consumo de gás natural, rácio ar/gás e temperatura da parede do forno.

Neste capítulo, é importante apresentar os valores associados à formação do monóxido de carbono (CO) pelo que este é um dos componentes possíveis de se formar dentro do forno, sendo um importante indicador sobre a qualidade da queima, ou seja sobre se esta é mais ou menos completa.

Tipicamente, a presença de CO varia inversamente à do NOx formado, ou seja, se ocorrer uma maior formação de CO é esperada uma menor formação de NOx.

Como se pode observar na Tabela 10, a redução do rácio ar/gás leva a uma diminuição de teor de oxigénio na exaustão e consequentemente, a uma maior formação de monóxido, sendo este um indicador de uma queima mais incompleta. Assim como foi referido, é visível que à medida que a formação de CO aumenta, diminuiu a formação de NOx.

Quanto ao teor de oxigénio importa dizer que mesmo no caso do ensaio 1 estava de acordo com as especificação internas da fábrica, (inferior a 5%) ^[14].

5.2.3 Monitorização na chaminé pelo CTCV

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para os ensaios monitorizados na chaminé pela equipa do CTCV.

É possível observar os valores referentes à formação de monóxido de carbono, óxidos de azoto, bem como o teor de oxigénio detectado no gás de exaustão.

Tabela 11 – Emissões gasosas registadas para o 1º e 2º ensaios em termos de monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NOx) e oxigénio (O₂)

	%O ₂	CO (ppm)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NOx (ppm)	NOx (mg/Nm ³) não corrigido	NOx (mg/Nm ³) 8% O ₂	VLE (mg/Nm ³) 8% O ₂
1º Ensaio	15	23	108,5	0,4	108,9	223,57	484,41	
	15,05	45	112,5	0	112,5	230,96	504,62	
	16,64	220	66,7	0	66,7	136,94	408,29	
2º Ensaio	9,4	2	260	0	260	533,78	598,37	
	8,98	2	275	0	275	564,58	610,77	1200
	9,49	2	278	0	278	570,73	644,80	
	Média							
	2º	9,29	2	271	0	271	556	618
	ensaio							

Durante o primeiro ensaio foram registados valores para teor de oxigénio elevados, tendo em conta todas as monitorizações já efectuadas bem como o valor de referência de 8%, ao qual este é corrigido. Este excesso de O₂ tira a representatividade dos resultados obtidos para o primeiro ensaio, conduzindo à realização de um novo ensaio, tendo despoletado a necessidade de efectuar certos ajustes nos parâmetros do forno de forma a corrigir o problema.

Como já foi referido, as principais razões para os valores de oxigénio encontrados são a abertura da válvula de diluição e a fenda detectada na câmara de exaustão. Contudo, a abertura da válvula pode ser ajustada, o que foi feito para o segundo ensaio. No caso da fenda não foi possível corrigir o problema, sendo esta responsável por um valor mais elevado de oxigénio na chaminé.

No capítulo 3, anteriormente apresentado, foi feita a análise das emissões gasosas na chaminé efectuadas pelo CTCV. Neste capítulo foi observado que com a excepção de um valor em 2003, o teor de oxigénio detectado na chaminé é inferior a 8%. Esta situação leva a concluir que de facto a fenda está a causar uma entrada de ar no processo.

Pelo motivo citado, as análises seguintes vão incidir no resultado registado para o segundo ensaio.

Relativamente à formação de NOx no segundo ensaio (618 mg/Nm³ corrigido a 8% de O₂) o que se observa é que é inferior ao VLE (1200 mg/Nm³ corrigido a 8% de O₂).

Em relação à formação de CO, observa-se que, no caso do pórtilco este aumentou do primeiro para o segundo ensaio. No caso da chaminé, não me parece correcto comparar os valores obtidos nos dois ensaios, contudo no segundo ensaio foi detectado um valor baixo de CO. Uma possível justificação para tal assenta na reacção do monóxido com o oxigénio, formando CO₂, como se apresenta na reacção seguinte.



A análise do percurso do gás entre o forno e a chaminé, permite distinguir algumas zonas como possíveis locais de entrada de ar, nomeadamente junto dos queimadores, devido ao mau isolamento e desgaste do material; no forno, especialmente nas juntas deste e na abóbada; na câmara de exaustão, nomeadamente através dos ventiladores do ar de combustão; nas condutas do gás, possivelmente devido a juntas mal isoladas; durante a passagem pelo filtro electrostático; junto da chaminé, em especial na entrada desta, uma vez que a chaminé do forno em estudo é de ferro, logo não deve ter rupturas ou ainda na chaminé é importante considerar o mau isolamento das tomas de amostragens que uma vez que se encontram aproximadamente no mesmo plano podem interferir com o resultado.

5.3 Conclusões

Conclui-se aqui sobre a importância dos parâmetros rácio ar/gás, consumo de gás natural e temperatura, na emissão de NOx.

O valor de NOx registado na chaminé pelo CTCV foi de 618 mg/Nm³ (corrigido a 8% de oxigénio), medido em base seca. Na mesma altura, o valor registado no pórtilco pelos operados da fábrica foi de 578 mg/Nm³ (corrigido a 8% de oxigénio). Este pequeno desfasamento que regista um valor mais alto de NOx à saída da chaminé estará associado ao teor de oxigénio medido na chaminé.

Em relação aos valores de NOx medidos na chaminé e no pórtilco, salienta-se que mais uma vez o valor da emissão de NOx medido na chaminé (618 mg/Nm^3 , corrigido a 8% de oxigénio) é superior ao valor medido no pórtilco (578 mg/Nm^3 , corrigido a 8% de oxigénio). Este facto, tal como atrás citado (ver p.f. capítulo 3, secção 3.3.2), regista que o valor da chaminé é superior. No entanto, embora este facto seja algo esperado, a existência de apenas estas duas situações não possibilita o estabelecimento de uma relação conclusiva mais definitiva sobre estes dois valores e pontos de medição.

As alterações das condições de funcionamento do forno entre o primeiro e segundo ensaio foram despoletadas devido aos elevados valores de oxigénio registados na chaminé do forno, originados pela fenda detectada na câmara de regeneração direita.

Um outro aspecto importante é a vantagem que a medição na chaminé apresenta em relação ao controlo das emissões no pórtilco. Através da monitorização na chaminé é facilmente detectável uma entrada de ar parasita uma vez que engloba todo o percurso que o gás faz, enquanto que medindo no pórtilco apenas se controla o que se passa dentro do forno.

Capítulo 6 - Condições de operação do forno AV5 antes, durante e após a monitorização das emissões gasosas na chaminé

Resumo

No presente capítulo são recolhidos e analisados os cinco parâmetros de operação do forno considerados como tendo uma influência significativa na emissão de NO_x. Mais especificamente são analisados a temperatura da parede do forno, a leitura óptica da temperatura, incorporação de casco, consumo específico do forno, rácio ar/gás e teor de oxigénio no gás de exaustão. Esta análise é completa com informação sobre a produtividade diária do forno.

O principal objectivo é a determinação da melhor gama de operação dos parâmetros do forno que permitisse baixar a emissão de NO_x. A análise aqui demonstrada é importante pois permite fazer um resumo histórico do funcionamento do forno desde 2005 até Junho de 2010.

Na análise é feito o estudo das medições efectuadas na chaminé do forno, considerando também um período próximo a estas monitorizações.

São apresentados os valores médios diários para os parâmetros mencionados, analisando-se a variação de cada um deles.

Para cada monitorização são apresentados os valores de NO_x obtidos, juntamente com o teor de oxigénio no gás de exaustão e ainda os dados relativos aos parâmetros de temperatura da parede, rácio ar/gás, consumo específico (gás natural e electricidade) correspondentes ao momento da caracterização (tendo uma duração entre 3 a 4h) de modo a poder tirar conclusões sobre quais as melhores condições do forno.

Em relação aos resultados com os valores médios diários de operação do forno foi possível inferir sobre a importância que parâmetros como a temperatura da parede e o casco apresentam no processo.

Como conclusão tem-se que sem a necessária componente experimental não se torna possível determinar a gama de parâmetros de operação do forno à qual estivesse associada uma melhor prática ambiental.

6.1 Introdução

6.1.1 Metodologia

Foram recolhidos valores sobre os principais parâmetros de operação do forno AV5 na BA Avintes, para os dois dias anteriores e posteriores à caracterização bianual, realizada pela entidade externa, no âmbito do enquadramento legal de monitorização das emissões gasosas da fábrica.

Os valores recolhidos incluem valores médios diários registados na fábrica da leitura óptica da temperatura no forno, a temperatura da parede, produtividade diária, percentagem de incorporação de casco, consumo energético específico (gás natural e ajuda eléctrica). O rácio ar/gás aqui apresentado é um valor médio mensal, encontrado nas folhas de registo mensal.

A leitura óptica da temperatura é medida por um aparelho designado pirómetro e permite saber qual a temperatura do ambiente do forno. Sendo uma leitura óptica, apenas é medida durante as inversões da queima dentro do forno para não ocorrer interferência da chama. A sua medição é efectuada através de uma vigia localizada na parede final do forno, de frente para as câmaras de regeneração.

A temperatura da parede é medida por um termopar colocado na parede final do forno, sendo por isso a medição feita de forma contínua. Esta é a temperatura que controla a injeção de gás natural para a combustão, na medida em que serve de *set point* do forno e o ajuste do gás é feito de modo a manter a temperatura da parede no valor estipulado.

Foi ainda necessário completar a informação com os valores pontuais do consumo específico total, rácio ar/gás, temperatura da parede e ainda teor de oxigénio no gás de exaustão, podendo analisar assim as emissões de NO_x obtidas na chaminé durante as monitorizações, corrigidas a 8% de oxigénio. A concentração do poluente e a percentagem de oxigénio no gás de exaustão são os valores registados pela entidade externa. Os dados apresentados referem-se ao período entre 2005 e 2010 pelos motivos já referidos aos quais está associado um trabalho com melhores condições de estabilidade de funcionamento do forno.

Estes valores permitiram construir uma tabela (Tabela 12) com o resumo das condições do forno, tanto os registos diários como as condições usadas na caracterização. Aqui foi

possível obter as gamas de variação de cada um dos parâmetros estudados, bem como comparar as médias diárias com os valores pontuais dos parâmetros.

A Tabela 12 reúne a informação relativa aos valores médios diários obtidos para o período analisado respeitantes à temperatura (leitura óptica e temperatura da parede), consumo energético do AV5 (gás natural e electricidade), produtividade diária, incorporação de casco e rácio ar/gás para a produção de vidro VR. Relativamente aos dados referentes às monitorizações do CTCV, a Tabela 12 inclui a emissão de NO_x, expressa em mg/Nm³ corrigida a 8% de O₂ (expresso em termos de NO_x), o teor de oxigénio no gás de exaustão, o consumo energético, a temperatura da parede e o rácio ar/gás, sendo estes valores referentes ao momento da caracterização. Para o caso da leitura óptica da temperatura, não foram encontrados registos referentes para o momento da medição.

Tabela 12 – Condições de operação do forno AV5 (valores médios diários e valores usados durante as monitorizações) - temperaturas (°C), tiragem (t/dia), % de incorporação de casco, consumo específico (kcal/kg), rácio ar/gás, % de O₂ no gás de exaustão e emissão de NOx (mg/Nm³, a 8% de O₂)

Data	Condições de operação do forno AV5 – valores médios diários registados na fábrica								Condições de operação do forno AV5 – valores médios registados durante o período de monitorização						
	Leitura óptica da T	T. Pared e	Tiragem	Incorporação de casco	Ajuda Electr	Gás Natural	Consumo específico	Rácio ar/gás	NOx Corrigido	%O ₂	Rácio ar/gás	Consumo específico	Gás Natural	Ajuda Electr	T da parede
	°C	°C	t/dia	%	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg		mg/Nm ³ (8% O ₂)			kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	°C
30.04.05	1581	1477	315,5	40,8	39	980	1019	14,5							
01.05.05	1584	1477	315,2	40,8	37	972	1008	13,0							
02.05.05	1582	1467	258,7	40,8	30	1106	1136	13,0	415	5,5	12,75	934	922	12	1446
03.05.05	1582	1478	333,9	40,8	44	941	985	13,0							
04.05.05	1583	1477	354,3	40,8	70	898	967	13,0							
04.10.05	1580	1478	349,2	51,6	27	953	980	13,0							
05.10.05	1581	1477	348,2	51,6	30	949	980	13,0							
06.10.05	1581	1462	350,6	47,7	37	833	870	13,0	887	8,5	13,00	768	697	72	1459
07.10.05	1581	1477	351,8	45,3	36	935	971	13,0							
08.10.05	1582	1477	352,0	47,8	43	919	962	13,0							
11.03.06	1581	1476	351,3	52,3	65	882	947	13,0							
12.03.06	1582	1476	351,0	52,3	63	866	929	13,0							
13.03.06	1570	1458	347,6	52,3	38	849	886	13,0	846	7,1	13,25	745	671	74	1427
14.03.06	1583	1476	339,9	52,3	66	900	966	13,0							
15.03.06	1583	1477	337,8	52,3	50	908	958	13,0							
27.08.06	1585	1511	355,4	50,5	69	866	935	13,0							
28.08.06	1582	1510	357,0	50,5	69	865	934	13,0							
29.08.06	1584	1487	360,3	50,5	72	819	891	13,0	537	4,5	12,5	721	647	74	1450
30.08.06	1586	1511	363,0	50,5	70	859	929	13,0							
31.08.06	1581	1511	356,1	50,5	68	874	942	13,0							
26.11.07	1585	1505	357,9	58,1	55	906	961	13,6							
27.11.07	1585	1507	349,3	58,1	51	917	968	13,6							
28.11.07⁷	1584	1497	346,0	58,1	56	911	967	13,6	724	7,3	12,70	770	770	-----	1440
29.11.07	1582	1506	346,0	58,1	48	909	956	13,6							
30.11.07	1590	1506	348,6	58,1	57	897	954	13,6							
04.06.08	1599	1505	360,9	56,0	33	990	1023	13,0							
05.06.08	1597	1503	360,7	56,2	34	927	962	13,0							
06.06.08	1598	1504	361,0	52,7	37	905	942	13,0	575	4,9	12,70	871	799	71	1434
07.06.08	1595	1504	361,0	58,0	39	910	948	13,0							
08.06.08	1594	1504	361,1	58,0	42	915	956	13,0							
07.10.08	1580	1500	368,9	68,5	28	923	951	13,0							
08.10.08	1587	1501	372,3	68,5	33	892	925	13,0							
09.10.08	1588	1499	375,0	68,5	50	865	915	13,0	708	5,4	11,80	809	740	69	1416
10.10.08	1584	1501	375,2	68,5	41	892	933	13,0							
11.10.08	1580	1501	374,6	68,5	30	926	956	13,0							
13.05.09	1584	1500	362,3	61,5	68	917	986	13,0							
14.05.09	1578	1501	351,5	61,5	69	951	1020	13,0							
15.05.09	1560	1468	355,0	61,5	69	887	955	13,0	438	6,0	11,00	826	750	76	1410
16.05.09	1590	1501	352,1	61,5	68	917	986	13,0							
17.05.09	1584	1501	352,5	59,7	59	982	1041	13,0							
30.08.09	1572	1488	306,9	69,7	38	950	988	13,0							
31.08.09	1573	1488	307,2	69,7	28	945	972	13,0							
01.09.09	1564	1483	308,0	69,7	62	922	984	13,0	541	7,2	11,80	931	851	80	1450
02.09.09	1571	1488	312,2	69,7	46	935	981	13,0							
03.09.09	1573	1488	320,3	69,7	52	914	967	13,0							
31.05.10	1580	1494	325,3	59,2	19	1042	1061	13,0							
01.06.10	1584	1496	328,5	61,5	11	1041	1052	13,0							
02.06.10	1589	1491	328,2	62,2	22	968	990	13,0	618	9,3	11,10	847	778	69	1433
03.06.10	1590	1496	321,2	63,5	10	1012	1022	13,0							
04.06.10	1583	1495	329,6	63,5	26	970	997	13,0							
Valor Mínimo	1560	1458	258,7	40,8	10	819	870	13	415	4,5	11,00	721	647	12	1410
Valor Máximo	1599	1511	375,2	69,7	72	1106	1136	14,5	887	9,3	13,25	934	922	80	1459

⁷ Em 2007 apenas uma das medições foi efectuada com vidro VR (verde-esmeralda).

6.2 Resultados

Em seguida são apresentados graficamente a evolução dos parâmetros analisados, nomeadamente as temperaturas, a produtividade diária, a incorporação de casco e o consumo do forno (gás natural e electricidade), em função do tempo. A estes parâmetros estão associados valores médios diários registados na fábrica para o dia das monitorizações e para dias próximos deste.

A Figura 27 que ilustra a evolução da leitura óptica da temperatura, permite observar que entre 2005 e 2007 esta temperatura manteve-se aproximadamente constante. Contudo, desde essa data, tem sido registada uma maior variação (entre 1560 e 1599 °C). Não foi encontrada uma justificação óbvia que permitisse explicar o porquê desta variação. De acordo com o documento interno da fábrica, o manual da fusão, este parâmetro não deveria exceder os 1550°C, o que acontece como se pode ver pela análise da Tabela 12. A leitura óptica da temperatura analisa na Figura 27 apresenta uma oscilação de 39°C, correspondente à gama de variação do parâmetro (1560-1599°C).

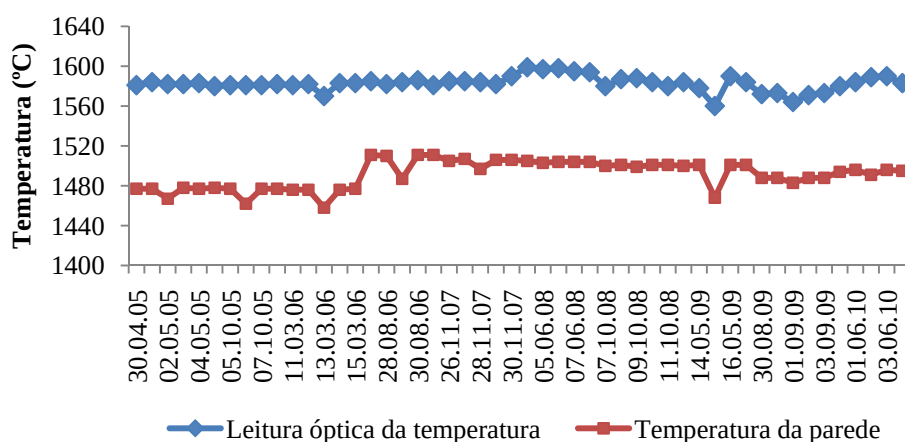


Figura 27 - Evolução da temperatura da parede e da leitura óptica da temperatura do forno AV5

Na Figura 27 é possível ver também a evolução da temperatura da parede. Existe uma relação entre esta temperatura e a anterior na medida em que, se a leitura óptica da temperatura se encontrar muito elevada, promove-se a redução da temperatura da parede para que ocorra diminuição da temperatura do forno. A temperatura da parede é essencialmente influenciada pela chama que se forma dentro do forno, sendo importante no seu controlo. No entanto, o valor registado de temperatura poderá ser influenciado,

por exemplo, pelo desgaste do aparelho de medição e o comprimento da chama. Mais especificamente, o comprimento da chama poderá registar um aumento ou diminuição da temperatura da parede sem necessariamente afectar a temperatura do forno. Este facto torna importante a análise de ambas as temperaturas. Existe uma relação importante entre esta temperatura e o desgaste do forno.

O registo da temperatura da parede do forno permite controlar a entrada de gás no forno, bem como o caudal de ar usado na combustão, sendo que este se ajusta de modo a manter o rácio ar/gás constante. Observando o gráfico da temperatura da parede do forno realça-se as quedas de temperaturas observadas durante as monitorizações gasosas (Figura 27).

A temperatura da parede apresenta uma maior variação do que a temperatura resultante da leitura óptica. Os valores variam de cerca 50 °C (entre 1458 e 1511°C). No entanto, importa relembrar que a temperatura da parede é registada por um termopar que devido ao processo de fusão sobre desgaste, podendo este interferir na medição.

O aumento considerável na temperatura da parede do forno em 2006 pensa-se estar associado ao aumento da produtividade média diária ocorrido nesse período (passou de cerca de 350 t/dia para 360 t/dia). Embora se trate da produção do mesmo tipo de vidro, ou seja, a temperatura de fusão não se altera, está a ser produzida uma maior quantidade logo é necessário que esta seja mais rápida, ao trabalhar com temperaturas mais elevadas dentro do forno consegue-se começar o processo mais rapidamente, sendo por isso usadas temperaturas mais elevadas. Esta é a justificação apresentada pela empresa para o facto de se aumentar a temperatura da parede.

A produtividade média diária do forno AV5 evoluiu ligeiramente até 2008 (Figura 28). Neste ano foram atingidos valores superiores à capacidade nominal do forno (367 t/dia). O valor máximo registado é de 375 t/dia. Em 2009 ocorre uma quebra na produtividade, que passa do máximo atingido (375 t/dia) para valores de 307 t/dia. Após esse momento, volta a notar-se um aumento gradual até ao valor final de cerca de 330 t/dia. A oscilação mínima e máxima está compreendida entre cerca de 259 (2005) e 375 t/dia (2008), ao qual corresponde uma variação de 117 t/dia.

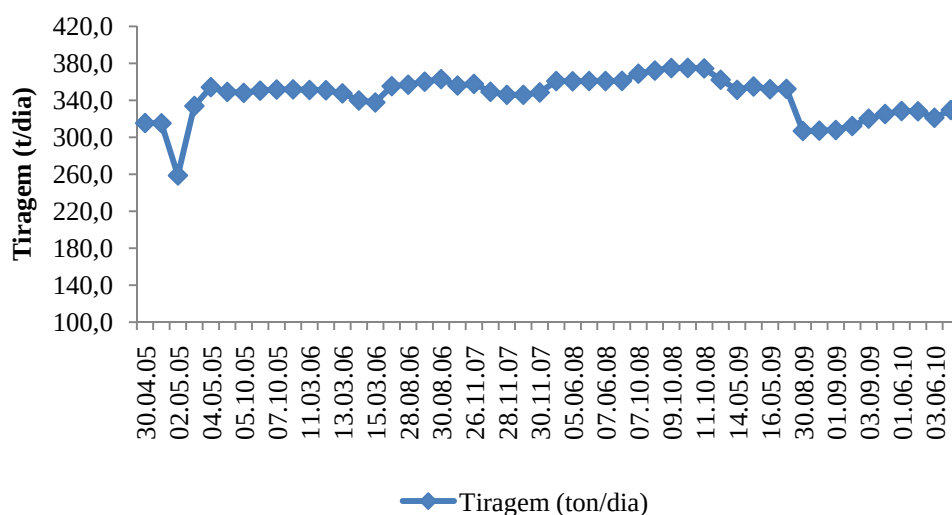


Figura 28 – Evolução da produtividade diária registada para a produção do vidro VR no período analisado

A Figura 29 apresenta a evolução na utilização de casco na produção de vidro verde-esmeralda. A sua gama de variação está compreendida entre 41 % (2005) e 70 % (2009). A tendência crescente da incorporação de casco é um facto importante no que respeita às emissões de NOx. Uma condição importante que se verifica é o aumento na incorporação de casco desde 2005 até à actualidade. Este é um factor importante que demonstra a aposta que tem sido feita para a redução na emissão de NOx. O casco permite à empresa reduzir os custos pois a sua incorporação é mais económica que a das restantes matérias-primas e a energia necessária para a sua fusão é inferior à das restantes matérias-primas. Apesar de o lado económico ser provavelmente o grande fomentador deste resultado na incorporação de casco, a verdade é que traz benefícios ambientais.

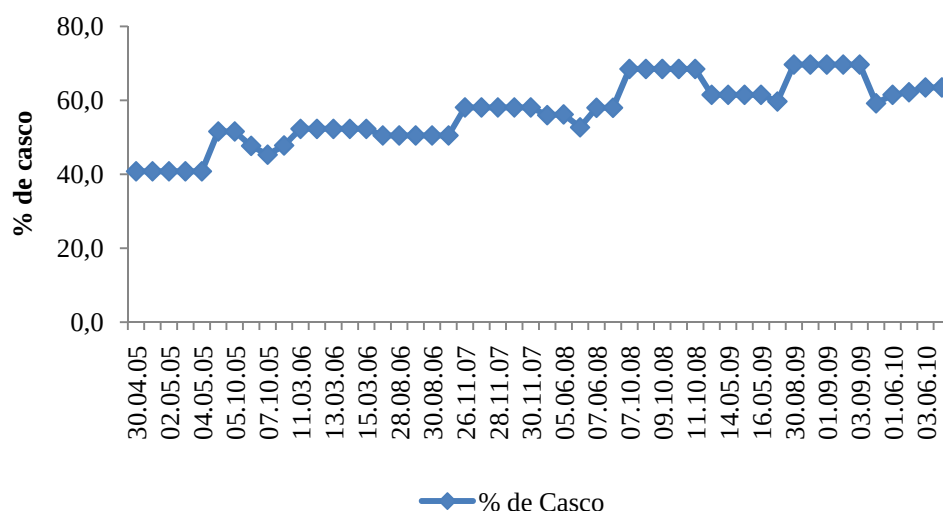


Figura 29 - Evolução da incorporação de casco de vidro no forno AV5

A Figura 30 ilustra-se a evolução dos consumos energéticos do forno AV5. Como se pode observar, o gás natural é a principal fonte energética do forno. O consumo específico total varia entre as 870 e 1136 kcal/kg. O consumo específico de gás natural está compreendido entre 819 e 1106 kcal/kg, enquanto o de energia eléctrica, muito mais baixo, varia entre 10 a 72 kcal/kg. Ao longo do tempo o consumo específico do forno AV5 é relativamente estável.

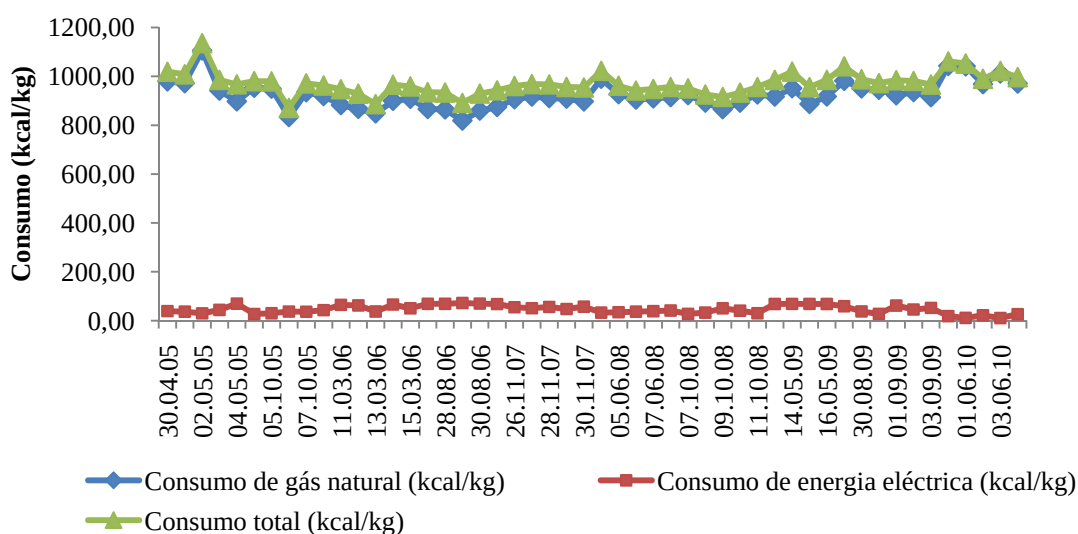


Figura 30 - Evolução dos consumos específicos de energia do forno AV5.

O parâmetro rácio ar/gás é um parâmetro com uma variabilidade reduzida. Este é usado como regulador para o controlo da fusão. Desta forma, quando ocorre uma alteração no consumo de gás natural, a injeção de ar é controlada pela necessidade de se atingir o rácio pretendido (tipicamente 13) que é considerado de modo a operar com um excesso de ar de 36%, ao qual corresponde um excesso de 7,2% de oxigénio. Este rácio é estipulado de modo a obter-se o teor de oxigénio no gás de exaustão (medido no pórtico) inferior a 5%.

Este parâmetro varia entre 13 e 14,5 para o período em análise, sendo o valor estequiométrico de 9,57.

Os restantes parâmetros analisados reflectem as condições durante as monitorizações, nomeadamente, ao que se refere aos parâmetros do forno (rácio ar/gás, consumo específico de gás natural e electricidade e temperatura da parede) são ainda apresentados os valores de emissão de NOx (mg/Nm³ corrigidos a 8% de O₂ e expresso em termos de NO₂) e o teor de oxigénio no gás de exaustão, medido na chaminé registado durante as monitorizações.

Pelo facto de haver uma diferença entre os valores referentes ao momento específico da medição e o valor médio diário não é possível concluir sobre a melhor situação de funcionamento que proporcionaria emissão de NOx mais reduzidas, bem como estabelecer uma gama de operação diária do forno corresponde a essa situação de melhor prática ambiental.

O consumo específico do forno durante a caracterização situa-se entre 721 e 934 kcal/kg.

Comparando com as médias diárias, verifica-se que o valor máximo registado durante as caracterizações se aproxima mais do limite mínimo obtido pelos registos diários (870 kcal/kg). Isto acontece uma vez que durante a medição o forno trabalha com temperaturas mais baixas e com um rácio ar/gás mais reduzido.

No caso da ajuda eléctrica verifica-se que a gama de variação obtida durante as caracterizações (12 a 80 kcal/kg) é ligeiramente superior à registada diariamente (10 a 72 kcal/kg). A redução do consumo de gás natural induz a um aumento da ajuda eléctrica de modo a controlar a temperatura do vidro. O consumo específico de gás

natural durante as caracterizações é de 647 a 922 kcal/kg, enquanto a registada diariamente varia entre 819 a 1106 kcal/kg.

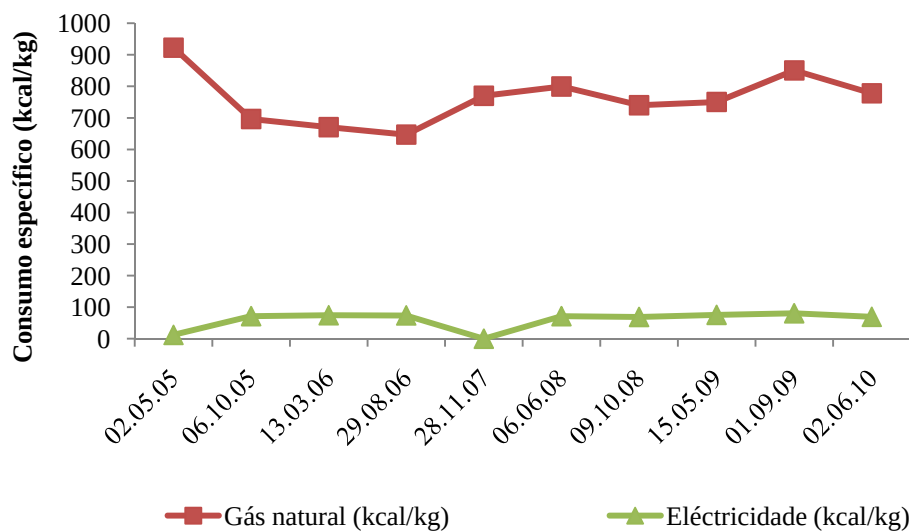


Figura 31 - Evolução do consumo específico do AV5 aplicado no momento da monitorização para o período analisado (2005 a Junho de 2010)

Também a temperatura da parede do forno se apresenta bastante diferente durante a monitorização (1410 e 1459 °C), enquanto nos registos diários o valor varia entre 1458 e 1511 °C.

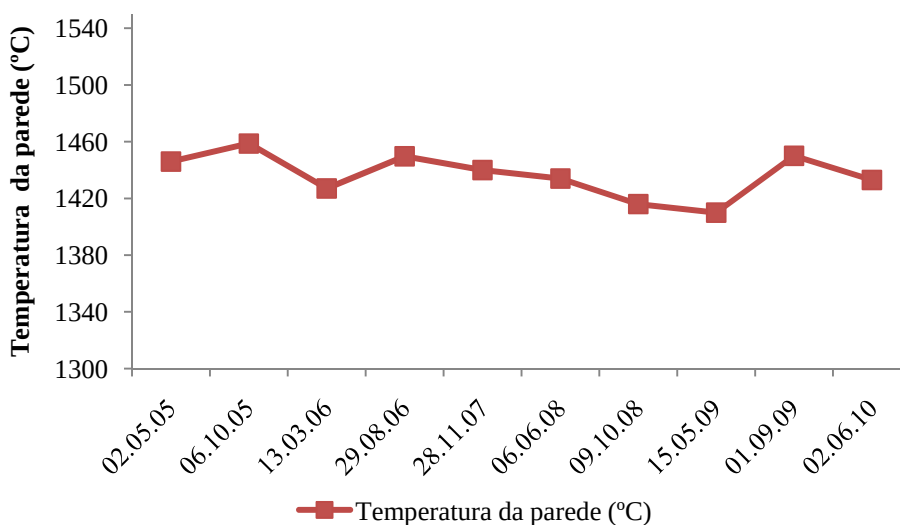


Figura 32 – Evolução da temperatura da parede aplicada no momento da monitorização para o período analisado (2005 a Junho de 2010)

Não foi possível obter o valor da leitura óptica durante as monitorizações.

O rácio ar/gás registado durante a monitorização varia entre um mínimo de 11 e um máximo de 13,25. Constatase que durante as monitorizações a queima ocorre com menor excesso de ar.

A análise da Tabela 12 permite inferir sobre a relação entre a emissão de NOx e o rácio ar/gás para cada monitorização. Observa-se uma tendência para a diminuição do rácio levar à redução da emissão do NOx (Figura 33). Embora os valores mínimo e máximo de emissão não correspondam aos mínimos e máximos de rácio ar/gás, o valor mínimo do parâmetro (11) está associado a uma emissão bastante baixa, de 438 mg/Nm³ corrigido a 8% de O₂, e o valor máximo do rácio ar/gás (13,25) corresponde a uma emissão elevada 846 mg/Nm³ corrigido a 8% de O₂.

Esta constatação atesta a importância deste parâmetro no controlo das emissões e que não tinha sido possível provar anteriormente (capítulo 3), por aqui ser analisado os valores registados durante as monitorizações.

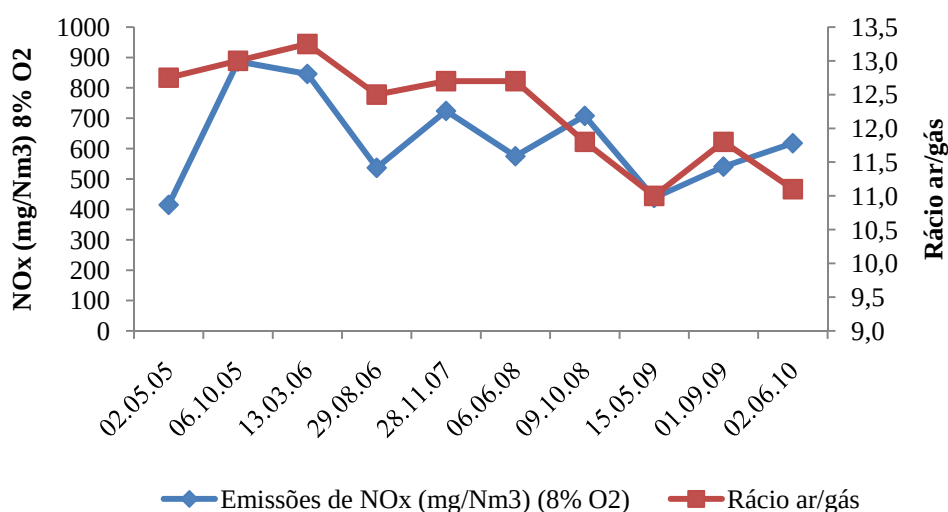


Figura 33 – Emissão de NOx e do rácio ar/gás registado durante a monitorização semestral das emissões gasosas no forno AV5 no âmbito do diploma legal de monitorização.

O teor de oxigénio no gás de exaustão apresenta uma oscilação entre 4,5 e 9,3%, sendo o máximo obtido na última monitorização, na qual foram registados problemas de entrada de ar parasita, o que provavelmente causa esta valor um pouco mais elevado.

Assim, como no caso do rácio ar/gás, o teor de oxigénio no gás de exaustão apresenta uma relação com a emissão de NOx, sendo que para este parâmetro a demonstração já

tinha sido conseguida através das análises apresentadas no capítulo 3, o que não aconteceu no caso do rácio.

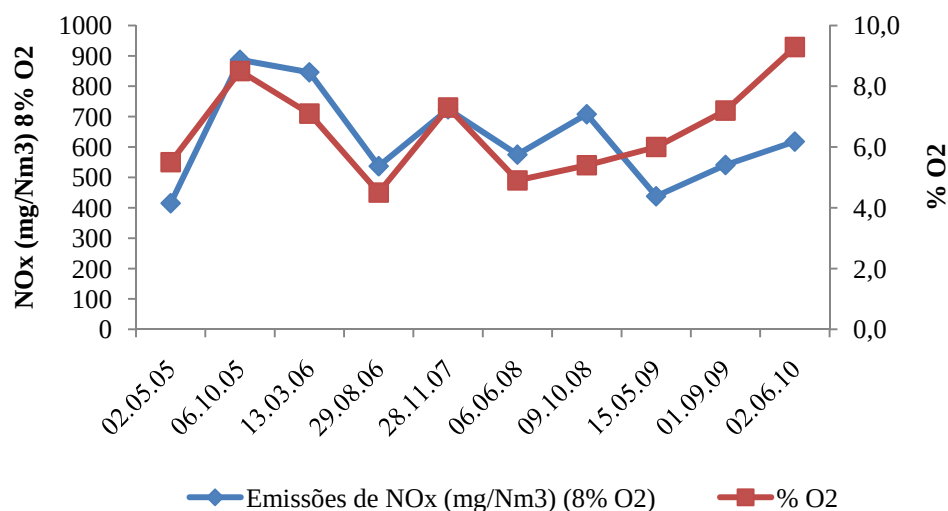


Figura 34 – Emissão de NOx e % de O₂ registado durante a monitorização semestral das emissões gasosas no AV5, no âmbito do diploma legal de monitorização

Não se verifica que o valor mínimo de O₂ (4,5) esteja associado à menor emissão de NOx (415 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂), no entanto este corresponde a uma baixa emissão do poluente (537 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂). Ao valor mais elevado de oxigénio (9,3%) corresponde a emissão de 618 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂.

6.3 Conclusão

No que respeita à leitura óptica da temperatura, aqui apresentada através de um valor médio diário observa-se uma gama de variação entre 1560 e 1599 °C. A temperatura da parede, também registada diariamente varia entre 1458 e 1511°C.

A produtividade média diária (tiragem) oscilou entre um mínimo de 258,7 t/dia e um máximo de 375,2 t/dia, ao qual corresponde uma variação de 117 t/dia.

A incorporação de casco variou em 29%, registando um mínimo de 41% e um máximo de 70%.

O consumo específico do forno, em termos de gás natural e registado diariamente variou entre 819 e 1106 kcal/kg.

Relativamente à ajuda eléctrica, verifica-se que para os registos médios diários a gama de variação está compreendida entre 10 e 70 kcal/kg.

O parâmetro rácio ar/gás oscila entre 13 e 14,5, no caso dos valores médios diários da fábrica.

Os valores de emissão de NOx oscilam entre 415 e 887 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂, expresso em termos de NO₂ e medido em base seca. O teor de oxigénio no gás de exaustão associado a cada uma delas oscilou entre 4,5 e 9,3%.

Foi possível demonstrar uma relação entre o rácio ar/gás durante as medições e a concentração de NOx, no sentido em que a diminuição deste rácio é tipicamente acompanhada pela diminuição da formação do poluente. Ao valor mínimo de rácio ar/gás (11), corresponde a segunda emissão mais baixa registada (438 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂), enquanto que ao valor máximo (13,25) está associada a segunda emissão mais elevada (708 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂).

Constata-se que o teor de oxigénio apresenta uma relação com a emissão de NOx, sendo que a emissão do poluente aumenta com o aumento do teor de oxigénio. Embora não se verifique que o valor mínimo de oxigénio (4,5 %) esteja associado à menor emissão de NOx, este corresponde a uma baixa emissão do poluente (537 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂). Ao teor mais elevado de oxigénio (9,3%) corresponde a emissão de 618 mg/Nm³, corrigido a 8% de O₂.

Verifica-se que existem algumas diferenças registadas entre os parâmetros avaliados, o que está, em parte, associado à duração dos registos de cada um dos parâmetros. Constata-se também que os valores médios diários são em geral superiores aos valores registados durante as medições das emissões gasosas na chaminé.

Para obter conclusões sobre qual a gama de operação dos parâmetros do forno à qual estaria associada uma redução das emissões de NOx seria necessário realizar testes experimentais visando testar estas e outras condições de operação, no sentido de encontrar uma boa solução.

Capítulo 7 - Conclusões, limitações ao estudo e trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Este estudo caracteriza as emissões de NOx produzidas no forno regenerativo de fusão, o AV5 para a fabricação de vidro verde-esmeralda. Foram analisados cinco parâmetros que se consideraram ser os mais importantes para o estudo da emissão deste poluente, nomeadamente, o rácio ar/gás, o teor de oxigénio no gás de exaustão, a temperatura do forno (temperatura da parede do forno e leitura óptica da temperatura), a percentagem de incorporação de casco e, o consumo de gás natural.

O estudo do forno evoluiu de forma gradual. Numa fase inicial, tentaram obter-se relações do tipo causa-efeito entre os parâmetros estudados e as emissões de NOx. Nesta análise inicial, concluiu-se que houve uma evolução divergente entre a emissão de NOx e a incorporação de casco de vidro no forno, ou seja, a redução das emissões foi acompanhada pela crescente incorporação de casco.

Em seguida foi realizada uma análise aos consumos energéticos específicos do forno, em função da produtividade diária e da incorporação de casco. Conclui-se aqui que este consumo diminui com o aumento da produtividade diária e da incorporação de casco. O consumo energético mínimo do forno é de 896 kcal/kg, correspondendo a uma produtividade de 365-369 t/dia, para 70-74% de incorporação de casco.

Na monitorização das emissões gasosas da fábrica BA Avintes, acompanhada no pórtilco pelos operadores da fábrica, foi possível concluir sobre a importância que os parâmetros apresentados neste estudo têm no controlo das emissões de NOx. Isto quer para a medição no pórtilco, como para a da chaminé. O valor de NOx medido encontra-se abaixo do limite legal de emissão da fábrica (1200 mg/Nm³ corrigido a 8% de oxigénio). Na chaminé, foi registada uma concentração de NOx de 618 mg/Nm³ (corrigido a 8% de oxigénio), medido em base seca. Já o valor registado no pórtilco pelos operadores da fábrica foi de 578 mg/Nm³ (corrigido a 8% de oxigénio).

No quadro resumo elaborado no capítulo 6 pretendia avaliar a possibilidade de determinar uma gama de trabalho à qual se associasse uma menor emissão de NOx, o que no entanto não se mostrou possível. Como principal conclusão deste capítulo

salienta-se a relação aqui evidenciada entre o rácio ar/gás e a emissão de NO_x, sendo que a diminuição do parâmetro é tipicamente acompanhada pela diminuição da formação do poluente.

Ao longo do trabalho aqui apresentado ficou demonstrada a importância da incorporação de casco e do rácio ar/gás para as emissões de NO_x. Quanto ao teor de oxigénio no gás de exaustão, observou-se que este apresenta de facto uma relação com o poluente, contudo não se pode dizer que esta seja do tipo causa-efeito, nomeadamente quando este parâmetro é medido na chaminé pois aí já não ocorre formação do poluente.

Uma vez que este estudo não pode ser completado com uma componente experimental que testasse a redução dos parâmetros de trabalho, não foi possível atingir na totalidade os objectivos que se pretendiam. No entanto, a caracterização das condições de operação do forno, bem como a análise do NO_x, seguiram o procedimento adequado, reforçando assim a ideia de que, a aposta numa componente experimental traria associada a si uma melhoria significativa num estudo desta natureza.

Por fim, conclui-se que o aumento da incorporação de casco no processo de produção do vidro verde-esmeralda no forno em estudo traz benefícios económicos e ambientais no sentido em que não só permite reduzir as emissões de NO_x, como também diminui os consumos energéticos do forno. O uso do casco é mais económico quando comparado com as restantes matérias-primas, o que reduz os custos associados à sua utilização, bem como a extracção dos recursos naturais.

7.2 Limitações do estudo

As limitações das análises apresentadas referem-se a frequência de medição do poluente e dos parâmetros considerados e falta de simultaneidade nas medições dos mesmos. O funcionamento do forno deveria ser analisado tendo em conta a variação de todos os parâmetros apresentados simultaneamente, pois só assim teríamos a evolução real de cada parâmetro.

Seria mais correcto que todos os parâmetros fossem relativos ao período exacto em que a medição decorreu, contudo, estes foram os dados possíveis de recolher, sendo no

entanto de esperar que esta diferença na escala temporal possa dificultar a interpretação dos resultados.

A inclusão de parâmetros como a chama e ainda uma análise mais exaustiva sobre o funcionamento dos queimadores de baixo-NO_x, no sentido de testar as suas condições de funcionamento seria uma mais valia para o estudo. Neste trabalho apenas foi possível identificar estes parâmetros como importante para esta análise. Num estudo mais aprofundado seria necessário explorar estes parâmetros no que respeita, por exemplo, à análise de perfis de temperatura da chama e à identificação e seguimento dos parâmetros de funcionamento dos queimadores.

7.3 Trabalhos futuros

A respeito da recolha e tratamento dos dados sobre os parâmetros de operação do forno, seria interessante para a empresa criar uma base de dados única onde fossem anotados durante a monitorização das emissões de NO_x todos os parâmetros aqui referidos e importantes para a formação do NO_x. O que se sugere é a criação de uma base de dados computacional onde fossem registados os valores de rácio ar/gás, consumos energéticos, temperaturas (leitura óptica e temperatura do forno), teor de oxigénio no gás de exaustão e incorporação de casco. Esta base de dados deveria no entanto ser completada com informação sobre a produtividade registada, bem como informação específica sobre a distribuição do gás natural pelos quatro queimadores instalados no forno. Importante referir que seria necessário determinar uma igual periodicidade para o registo dos parâmetros.

Seria igualmente interessante incluir na análise outros parâmetros que não foram abordados neste estudo, como por exemplo, os perfis de temperatura da chama e os parâmetros de funcionamento dos queimadores, nomeadamente os ângulos de posicionamento vertical dos queimadores e a velocidade de injeção do gás natural. Esta informação poderia ser compilada e adicionada aos registos recolhidos durante as monitorizações.

Sendo uma limitação ao estudo aqui apresentado, futuramente recomenda-se que este seja completado com a necessária componente experimental, não realizada até ao momento. Deste modo, seria interessante passar agora a testar a possibilidade de reduzir

alguns parâmetros de operação do forno, como o rácio ar/gás, o consumo de gás natural e a temperatura do forno. Aqui seriam identificadas as gamas de variação dos parâmetros do forno, aqui analisados, que possibilitariam condições de trabalho às quais estivesse associada uma menor emissão de NOx.

Por último, caso o resultado fosse inconclusivo, seria importante considerar a implementação de medidas primárias de redução das emissões de NOx. Considera-se por exemplo, a aplicação da tecnologia denominada por combustão por fases, isto tendo em vista uma melhoria contínua do desempenho ambiental da fábrica. O princípio de funcionamento desta tecnologia baseia na realização de uma queima inicialmente em condições sub-estequiométricas, sendo depois adicionado ar ou oxigénio no forno de modo a completar a combustão. Esta tecnologia pode levar a reduções nas emissões de NOx superiores a 70 %. No entanto, a sua possível aplicação requer um estudo pormenorizado tanto em termos de custos operacionais como de todos os aspectos de funcionamento de um forno nestas condições ^[3].

Referências bibliográficas

- [1] Shelby, James E., *Introduction to Glass Science and Technology*, The Royal Society of Chemistry, 1997.
- [2] Akerman, Mauro; *Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro*, Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint Gobain Vidros Brasil, Novembro de 2000
- [3] European Commission, *Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry*, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Dezembro de 2001
- [4] Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV), Associação dos Industriais de Vidro de Embalagem (AIVE), *Sector do Vidro, Vidro de Embalagem e Vidro Plano*, 2002
- [5] Akerman, Mauro; *A Elaboração do Vidro*, Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint Gobain Vidros Brasil, Novembro de 2000
- [6] Noel de Nevers, *Air Pollution Control Engineering*, 2ª edição, McGraw-Hill International Editions, 2000
- [7] Alvim-Ferraz, M. C., *Air Contamination*, Departamento de engenharia química da Universidade do Porto, apontamentos da disciplina de Gestão e Controlo das Emissões Gasosas, 2008-2009
- [8] Decreto-Lei nº 78/2004 de 3 de Abril - Estabelece o regime de prevenção e controlo das emissões de poluentes para a atmosfera, Diário da República, 1ª Série – A, n.º 80, pp. 2136

- [9] Portaria nº 286/2003 de 12 de Março - Estabelece os valores limite de emissão de concentração de poluentes na atmosfera, Diário da República, 1ª Série – B, n.º 60, pp. 1169
- [10] Decreto-lei nº 194/2000 de 21 de Agosto - Estabelece o regime de prevenção e controlo integrados, Diário da República, 1ª Série – A, n.º 192, pp. 4116
- [11] Licença Ambiental nº 96/2008, Prevenção e Controlo Integrados da Poluição – Licenciamento Ambiental da Instalação BA Vidro, S.S. – Unidade de Avintes (Vila Nova de Gaia)
- [12] <http://188.93.230.35/~bavidros/> (acedido em Julho de 2010)
- [13] <http://www.abividro.org.br> (acedido em Junho de 2010)
- [14] Manual da fusão – Documento Interno da empresa BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes
- [15] Descrição das Actividades, Documento Interno da empresa BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes
- [16] Especificações para avaliar a qualidade do casco, Documento Interno da empresa BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes
- [17] Ordem de alteração da receita, Documento Interno da empresa BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes
- [18] Alternative Control Techniques Document— NO Emissions from Glass Manufacturing, Emission Standards Division, U.S. Environmental Protection Agency, Junho 1994
- [19] Composição/fusão, Documento Interno da empresa BA Vidro, S.A. – Unidade de Avintes

- [20] <http://www.sgmondego.com> (acedido em Julho de 2010)
- [21] Rodrigues, H. P., *Fornos de fusão na indústria vidreira – Optimização energética e matérias-primas*, Dissertação par obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, Instituto Superior Técnico (UTL), Julho de 2007
- [22] Mota, O., Apontamentos da disciplina de Energia e Ambiente, 2008-2009
- [23] <http://www.proclira.uevora.pt/modulos/modulo5.pdf> (acedido em Julho de 2010)
- [24] <http://www.ctcv.pt/> (acedido em Junho 2010)
- [25] Norma Portuguesa NP 2167:2007, define as condições para amostragem em plataformas em fontes fixas estacionárias

Anexo I – Processo de tratamento do casco

Tabela I-13 - Processo de tratamento do casco na estação de tratamento da BA Avintes

<i>Fase</i>	<i>Designação</i>	<i>Descrição</i>
1	Recepção de casco	Armazenamento em eira de resíduos de vidro (casco) recepcionados do exterior.
	Enchimento da tremonha	-
2	1ª Separação dos materiais ferrosos	Separação electromagnética dos contaminantes ferrosos que se encontram disseminados pelo casco.
	1ª crivagem	Separação granulométrica de modo a que o material graúdo seja retirado antes de ser sujeito a britagem, o que confere granulometrias possíveis de serem lidas nas máquinas de remoção dos contaminantes.
	Separação manual dos contaminantes	Os contaminantes cerâmicos, pedras, plásticos, madeiras e outros orgânicos que possam interferir ou alterar a qualidade do vidro de embalagem e estão referidos nas listas de especificação da fábrica são removidos manualmente.
3	Britagem	Consiste em reduzir a granulometria para permitir ao material ser tratado pelas máquinas de inspecção automáticas. Permite remover outros contaminantes como cápsulas, ainda presentes no casco.
4	2ª Separação de materiais ferrosos	Remoção de contaminantes ferrosos
	Separação de materiais não ferrosos	Remoção de contaminantes não ferrosos através de correntes de Foucault
5	Transporte e separação granulométrica	
	Alcatruz	Elevação de material para dar início à separação granulométrica
	Ciclone	Retira produtos leves como papeis, plásticos para que estes não atinjam as máquinas que fazem a detecção dos

		cerâmicos, pedras e porcelanas (máquinas Aut Blinder), o que iria interferir na sua eficiência.
6	Separação granulométrica	
	2ª criva	Separação granulométrica de casco em finos, médios e graúdos para iniciar o ciclo de separação automática dos contaminantes.
	1º Conjunto de máquinas Aut Blinder	É o primeiro estágio de remoção de contaminantes existentes no casco. O conjunto inclui três máquinas para tratar as três granulometrias de casco (finos, médios e graúdos) As máquinas são de leitura óptica (câmaras ópticas digitais), detectam e rejeitam produtos não vidro por sopro.
	2º Conjunto de máquinas Aut Blinder + mesas vibrantes	É o segundo estágio de remoção de contaminantes. Os finos são tratados por máquinas automáticas. Os médios e os graúdos são sujeitos a inspecção visual.
	Separação de orgânicos	Este equipamento recebe o produto rejeitado das máquinas de inspecção automática e remove o material orgânico, voltando o rejeitado a passar nas máquinas de inspecção automática.
	3º Conjunto de máquinas Aut Blinder	Recebe o produto rejeitado do 1º e 2º conjunto de máquinas de Aut Blinder que passaram por separação de orgânicos. O seu objectivo é reduzir os contaminantes do produto rejeitado uma vez que este vai ser novamente introduzido no processo para ser retratado.
	Máquina de recolha de amostras	Retira amostras do produto final para controlo de qualidade, verificando se cumprem as especificações definidas. A amostragem ocorre em ciclos de 30 minutos, sendo os resultados registados automaticamente pela máquina, por controlo estatístico.
7	Produto final	
	Tapete de descarga	Transporta o produto tratado para a eira de produto final.

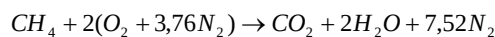
Anexo II - Cálculos efectuados para determinar o rácio ar/gás estequiométrico e o excesso de ar

1 - Determinação do rácio ar/gás:

Considerando :

$$P = 1atm = 101,325kPa$$

$$T_{ambiente} = 20^{\circ}C = 293,15K$$



$$M(gás) = 12 + 4 = 16g / mol$$

$$M(ar) = \frac{1}{5} \times 32 + \frac{4}{5} \times 28 = 28,8g / mol$$

$$PV = mRT$$

$$R_{gás} = \frac{8,314}{16} = 0,52kJ / (kg.K)$$

$$R_{ar} = \frac{8,314}{28,8} = 0,289kJ / (kg..K)$$

Considerando :

$$mgás = 1kg$$

$$101,325 \times V_{gás} = 1 \times 0,52 \times 293,15 \Leftrightarrow V_{gás} = 1,5m^3$$

$$mar = AC(kg / kg)$$

$$AC = \frac{2 \times (32 + 3,76 \times 28)}{16} = 17,16kg / kg$$

$$101,325 \times Var = 17,16 \times 0,289 \times 293,15 \Leftrightarrow Var = 14,35m^3$$

$$Rácio(ar / gás) = \frac{Var}{V_{gás}}$$

$$Rácio(ar / gás) = \frac{14,35}{1,5} = 9,57$$

Onde:

P pressão (kPa)

T temperatura (K)

M massa molar (g/mol)

V Volume (m³)

m massa (kg)

R Constante universal dos gases ideais (kJ/kg.K)

AC Rácio mássico ar/gás (kg ar/kg gás)

2 - Cálculo para determinar o excesso de ar correspondente ao rácio ar/gás de 13:

$$\text{Rácio ar / gás} = \frac{Var}{Vgás}$$

$$Vgás = 1,5m^3$$

$$Var = 1,5 \times 13 = 19,5m^3$$

Considerando :

$$P = 1atm = 101,325kPa$$

$$T = 20^\circ C = 293,15K$$

$$Rar = \frac{8,314}{28,8} = kJ / kg.k$$

$$mar = \frac{PV}{RT} = \frac{101,325 \times 19,5}{0,289 \times 293,15} = 23,32kg$$

$$mar = \text{excesso de ar} \times AGreal \Leftrightarrow \text{excesso de ar} = \frac{23,32}{17,16} = 1,36 \Rightarrow 36\% \text{ Ar em excesso}$$

onde :

$AGreal$ – É o rácio mássico ar / gás (kg ar / kg gás) determinado no capítulo anterior
 $= 17,16 \text{ kg ar / kg gás}$

O ar em excesso pode ser obtido por outra forma mais simplificada, sendo que esta consiste na razão entre o rácio ar/gás real e o estequiométrico (9,5). Como se pode observar, os resultados obtidos são idênticos.

$$\lambda = \frac{\text{Rácio ar / gás real}}{\text{Rácio ar / gás estequiométrico}}$$

$$\lambda = \frac{13}{9,57} = 1,36 \Rightarrow 36\% \text{ Ar em excesso} \Rightarrow 7,2\% O_2$$

Anexo III – Tabelas usadas para a elaboração dos gráficos sobre as medições de NOx no pórtico

As tabelas seguintes serviram de base à criação dos gráficos apresentados no estudo.

Tabela III-14 – Dados relativos aos parâmetros aplicados durante as medições no pórtico

	14.04.2008	12.06.2008	29.09.2008	07.10.2008	13.03.2009	17.04.2009	15.05.2009	19.08.2009	02.09.2009	Mínimo	Máximo
NOx (mg/Nm ³) (8% de O ₂)	1487,23	973,37	1101,34	914,55	787,35	782,72	283,70	1220,65	1337,93	283,70	1487,23
Rácio ar/gás	14	13,8	13,8	12,5	13,13	11,88	11,88	13,50	12,75	11,88	14,00
% O ₂ no gás de exaustão	2,5	1,7	1,7	2,2	1,62	1,53	1,32	3,09	3,32	1,32	3,32
Caudal de gás fixo (kcal/kg)	888,0	979,3	1047,6	870,1	1034,39	910,62	849,52	928,14	959,96	849,52	1047,56

Tabela III-15 – Dados relativos aos registos diários usados na construção dos gráficos para as medições no pórtico

	14.04.2008	12.06.2008	29.09.2008	07.10.2008	13.03.2009	17.04.2009	15.05.2009	19.08.2009	02.09.2009	Mínimo	Máximo
Tiragem (t/dia)	350,00	362,70	320,00	367,40	339,10	373,00	355,40	354,00	312,20	312,20	373,00
% de casco	52,2	65,4	67,9	68,5	63,5	65,4	66,1	68,0	69,7	52,2	69,7
Gás natural (m ³ /dia)	34930	37300	33670	36810	36180	35400	34030	35180	31570	31570	37300
Gás natural (kcal/kg) (a)	923,15	951,27	973,27	926,76	986,92	877,88	885,70	919,25	935,37	877,88	986,92
Electricidade (kWh)	26200	11980	0	11840	17410	30410	28320	25640	16570	11840	30410
Electricidade (kcal/kg) (a)	64,38	28,41	0	27,71	44,15	70,11	68,53	62,29	45,64	27,71	70,11
Consumo (kcal/kg)	982,0	979,6	989,1	950,6	1028,83	950,70	938,73	985,71	980,8743	938,73	1028,83
Leitura óptica da temperatura (°C)	1590,0	1592,0	1588,0	1580,0	1584,0	1585	1560	1574	1571	1560,00	1592,00
Temperatura do vidro (°C)	1230,0	1252,0	1222,0	1263,0	1259,3	1228	1210,3	1257,3	1212,7	1210,30	1263,00
Temperatura da parede final (°C)	1506,0	1504,0	1506,0	1500,0	1501,0	1506	1468	1500	1488	1468,00	1506,00

(a) O cálculo dos consumos em kcal/kg é feito seguindo o seguinte procedimento:

Gás natural

$PCI \text{ gás natural} = 9250 \text{ kcal} / \text{m}^3$ (valor médio)

$$\text{Consumo gás natural (kcal / kg)} = \frac{\text{Consumo}(\text{m}^3 / \text{dia}) \times PCI}{\text{tiragem}(\text{ton}) \times 1000}$$

Exemplo :

14.04.2008

$$\text{Consumo GN (kcal / kg)} = \frac{34930 \times 9250}{350 \times 1000} = 923,15 \text{ kcal / kg}$$

Electricidade

$$\text{Consumo electricidade (kcal / kg)} = \frac{\text{Consumo}(\text{kW}) \times 860}{\text{tiragem}(\text{ton}) \times 1000}$$

Exemplo

14.04.2008

$$\text{Consumo Electricidade (kcal / kg)} = \frac{26200 \times 860}{350 \times 1000} = 64,38 \text{ kcal / kg}$$

Anexos IV – Outros parâmetros analisados no capítulo 3: medições no pórtico

Medições pórtico

Os gráficos aqui apresentados foram obtidos durante a análise dos dados referentes às medições no pórtico, contudo não se mostraram suficientemente relevantes no estudo do NOx, sendo por isso remetidos para anexo.

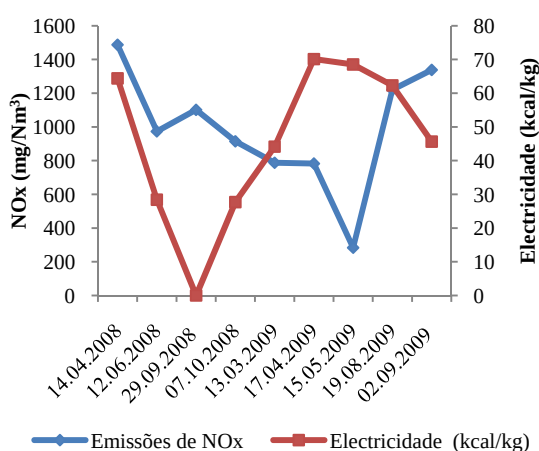


Figura IV- 35- Relação entre as emissões de NOx e o consumo de electricidade

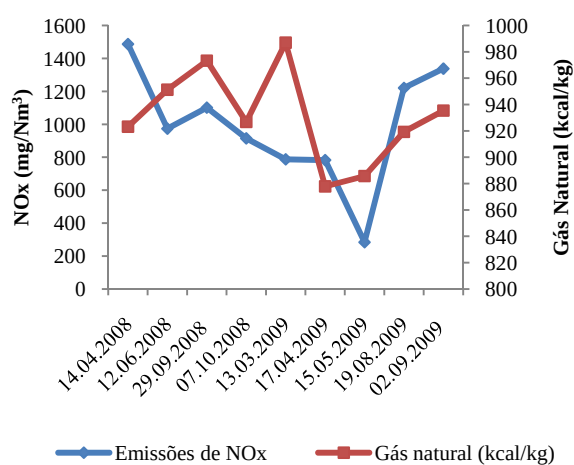


Figura IV- 36 - Relação entre a emissão de NOx e o consumo de gás natural

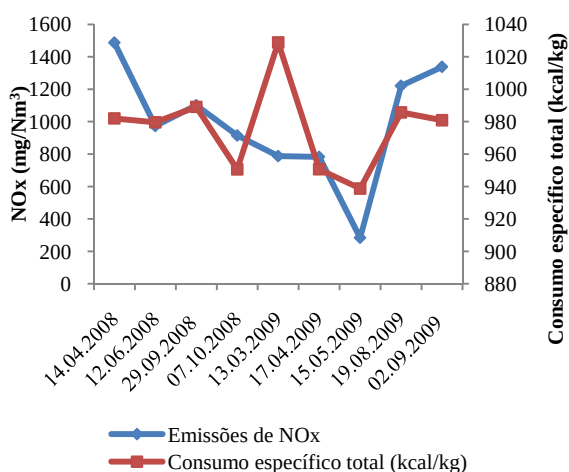


Figura IV-37 - Relação entre as emissões de NOx e o consumo energético total

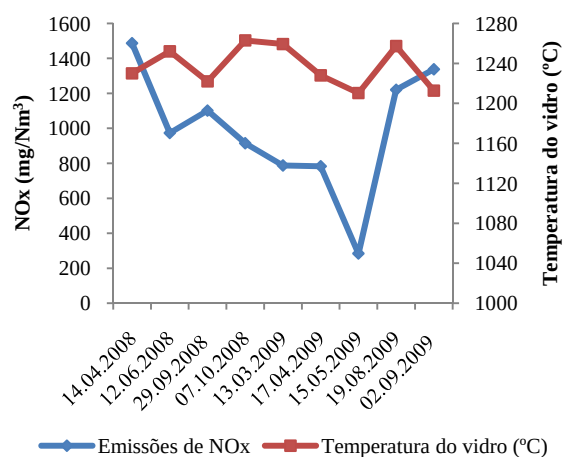


Figura IV-38 - Relação entre as emissões de NOx e a temperatura do vidro

Anexo V – Tabela usada na elaboração dos gráficos sobre as medições de NOx na chaminé do forno AV5

Na Tabela V-16 é possível observar os dados que deram origem aos gráficos apresentados na análise das medições do CTCV.

Tabela V - 16 - Dados usados na análise das medições do CTCV

	06.09.00	19.01.01	27.09.01	12.06.02	04.12.02	22.05.03	29.10.03	18.06.04	15.11.04	02.05.05	06.10.05	13.03.06	29.08.06	28.11.07	06.06.08	09.10.08	15.05.09	01.09.09	Mínimo	Máximo
NOx corrigido a 8% de O ₂ (mg/Nm ³)	1187	896	631	808	1207	1104	1094	568	732	415	887	846	537	724	575	708	438	541	415	1207
O ₂ (%)	4,3	3,7	3,5	4	4,4	9,6	8,1	6,1	7,9	5,5	8,5	7,1	4,5	7,3	4,9	5	6	7,2	3,5	9,6
Tiragem (t/dia)	352	359	357	357	365	398	281	299	254	259	351	351	351	344,385	358,61	326,53	350,00	306,075	254	397,8
Gás Natural (Nm ³ /dia)	34620	34610	27430	35110	40870	36900	28160	28040	28200	30930	33384	31580	31890	34070	35320	35070	34030	30710	27430	40870
Gás Natural (kcal/kg)	909	893	711	910	1036	858	927	867	1027	1106	881	833	841	915	911	993	899	928	711	1106
Casco (%)	59,3	51,5	41,1	34	35	45,9	64	55,6	52,9	40,8	50	64,1	55,5	63,1	62,8	72,6	66,1	73,7	34	73,7
Energia Eléctrica (kW)												29190	30270	22570	15940	21990	28320	22180	15940	30270
Energia Eléctrica (kcal/kg)												71,6	74,3	56,4	38,2	57,9	69,6	62,3	38,2	74,3

Anexo VI – Outros parâmetros analisados no capítulo 3: medições na Chaminé

Parâmetros relativos à produtividade e consumo energético analisados nas medições de NOx na chaminé.

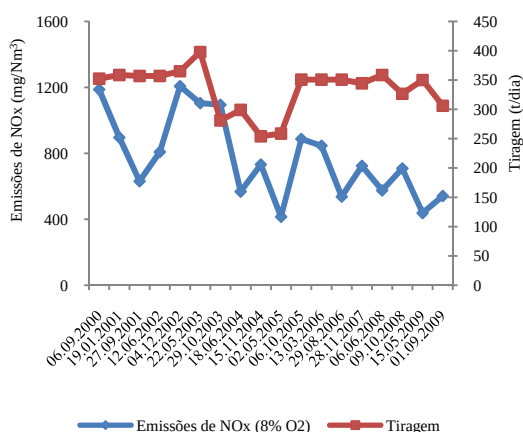


Figura VI - 39 - Relação entre as emissões de NOx e a produtividade

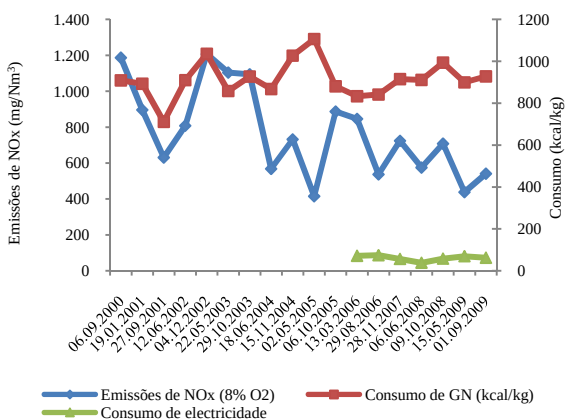


Figura VI - 40 - Relação entre as emissões de NOx, consumo de gás natural e de eletricidade

Anexo VII – Tabela com dados de consumos específico do forno, incorporação de casco e produtividade diária ente 2005 e Fevereiro de 2010

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
21-Fev-10	359,6	53,6	1070,33
20-Fev-10	358,8	55,4	1039,81
19-Fev-10	363,2	60,8	1019,94
18-Fev-10	373,7	62,5	1018,77
17-Fev-10	367,3	61,0	981,83
16-Fev-10	353,4	59,7	1030,55
15-Fev-10	350,7	60,4	1013,78
14-Fev-10	349,5	63,0	1006,10
13-Fev-10	348,8	63,6	1022,53
12-Fev-10	350,2	64,1	974,99
11-Fev-10	359,7	65,6	999,11
10-Fev-10	368,3	66,5	989,44
09-Fev-10	375,5	66,7	964,48
08-Fev-10	374,3	66,7	984,26
07-Fev-10	379,5	66,5	975,60
06-Fev-10	378,8	66,5	956,07
05-Fev-10	380,0	66,9	983,63
04-Fev-10	377,3	63,7	963,24
03-Fev-10	370,5	51,5	1066,35
05-Out-09	364,5	55,4	1000,92
04-Out-09	365,6	60,0	974,07
03-Out-09	366,0	69,0	940,71
02-Out-09	353,2	72,3	927,72
01-Out-09	352,2	72,3	935,60
30-Set-09	363,1	72,3	903,68
29-Set-09	357,4	72,3	928,22
28-Set-09	356,3	72,3	930,30
27-Set-09	356,3	72,3	912,01
26-Set-09	356,6	72,3	925,37
25-Set-09	356,8	72,3	919,80
24-Set-09	358,0	72,3	924,48
23-Set-09	359,6	72,3	909,41
22-Set-09	360,2	72,2	931,99
21-Set-09	365,2	71,8	895,55
20-Set-09	370,2	72,0	918,37
19-Set-09	370,2	72,3	925,52
18-Set-09	370,3	72,0	942,36
17-Set-09	371,3	71,8	956,13
16-Set-09	356,1	71,8	927,79
15-Set-09	343,4	70,8	955,45
14-Set-09	339,8	70,3	947,94
13-Set-09	336,4	70,4	946,64
12-Set-09	336,8	70,3	966,30
11-Set-09	336,9	70,3	970,53
10-Set-09	324,0	70,3	976,15
09-Set-09	312,2	70,3	987,75
08-Set-09	311,8	70,3	987,50
07-Set-09	315,1	70,3	978,51
06-Set-09	318,2	69,7	942,86
05-Set-09	317,9	69,7	969,46
04-Set-09	317,7	69,7	975,23
03-Set-09	320,3	69,7	966,54
02-Set-09	312,2	69,7	981,01
01-Set-09	307,5	69,7	985,83
31-Ago-09	307,2	69,7	972,09
30-Ago-09	306,9	70,4	988,06
29-Ago-09	307,4	70,4	1001,59
28-Ago-09	304,6	70,3	1001,13
27-Ago-09	307,2	70,3	1017,65
26-Ago-09	307,1	70,3	1024,12
25-Ago-09	303,3	68,8	1054,67
24-Ago-09	324,2	68,1	987,34
23-Ago-09	350,0	68,1	952,13
22-Ago-09	351,0	68,1	984,62
21-Ago-09	349,9	68,1	962,47
20-Ago-09	350,5	68,1	972,51
19-Ago-09	352,5	68,0	985,72
18-Ago-09	354,3	68,1	955,19
17-Ago-09	329,1	68,1	976,62
16-Ago-09	306,1	66,3	1040,05
15-Ago-09	306,9	65,4	1006,73
14-Ago-09	307,4	65,4	1005,25
13-Ago-09	306,8	65,4	1025,49
12-Ago-09	306,3	65,4	1025,40
11-Ago-09	306,4	65,4	1014,01
10-Ago-09	306,7	63,5	1033,59
09-Ago-09	305,7	64,2	1026,96
08-Ago-09	305,8	64,2	1005,67
07-Ago-09	305,7	63,8	1015,63
06-Ago-09	306,7	62,9	997,60
05-Ago-09	344,3	62,9	953,39
04-Ago-09	372,9	50,9	955,60
18-Mai-09	348,0	56,8	1002,32
17-Mai-09	352,5	59,7	1040,75

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010 -
(Continuação)

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
16-Mai-09	352,1	60,3	985,58
15-Mai-09	355,4	61,5	954,23
14-Mai-09	360,0	61,5	995,61
13-Mai-09	362,3	61,5	985,57
12-Mai-09	364,5	61,4	986,68
11-Mai-09	373,2	63,0	973,86
10-Mai-09	381,7	65,7	964,70
09-Mai-09	382,8	65,7	963,11
08-Mai-09	381,8	65,7	963,86
07-Mai-09	382,2	61,1	961,11
06-Mai-09	381,1	58,8	965,08
05-Mai-09	379,1	58,8	962,85
04-Mai-09	379,5	58,8	946,90
03-Mai-09	378,7	58,8	953,87
02-Mai-09	379,0	60,9	943,01
01-Mai-09	379,6	61,9	951,39
30-Abr-09	375,5	61,9	949,88
29-Abr-09	366,7	64,4	961,26
28-Abr-09	360,9	65,5	950,68
27-Abr-09	361,3	65,4	938,42
26-Abr-09	361,6	65,4	965,51
25-Abr-09	361,5	65,4	955,88
24-Abr-09	361,3	65,4	955,46
23-Abr-09	361,5	65,4	959,02
22-Abr-09	360,6	65,4	964,63
21-Abr-09	364,5	65,4	953,76
20-Abr-09	370,1	65,4	965,99
19-Abr-09	369,8	65,4	961,24
18-Abr-09	370,4	65,4	972,49
17-Abr-09	371,9	65,4	950,80
16-Abr-09	373,8	65,8	948,35
15-Abr-09	372,7	65,9	980,11
14-Abr-09	373,2	65,9	955,31
13-Abr-09	372,9	65,9	951,84
12-Abr-09	373,6	65,9	946,96
11-Abr-09	373,9	65,9	952,22
10-Abr-09	372,4	68,3	932,45
09-Abr-09	373,4	69,4	966,30
08-Abr-09	354,4	69,4	959,88
07-Abr-09	337,4	67,5	990,95
06-Abr-09	326,4	66,5	996,69
05-Abr-09	316,3	66,1	1052,42
04-Abr-09	315,7	65,9	1051,52
03-Abr-09	314,9	66,4	1048,93
02-Abr-09	315,3	66,5	1034,01
01-Abr-09	318,7	65,7	1020,65

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
31-Mar-09	320,7	63,1	982,77
30-Mar-09	320,0	63,5	1009,15
29-Mar-09	319,7	63,5	940,59
28-Mar-09	320,1	63,5	1001,48
27-Mar-09	318,7	63,5	1003,68
26-Mar-09	318,9	63,5	1022,97
25-Mar-09	327,3	63,5	999,40
24-Mar-09	338,5	63,5	998,97
23-Mar-09	339,7	63,5	972,75
22-Mar-09	340,0	63,5	952,49
21-Mar-09	340,2	63,5	970,73
20-Mar-09	340,3	63,5	966,60
19-Mar-09	340,5	63,5	989,78
18-Mar-09	340,5	63,5	1011,05
17-Mar-09	340,4	63,5	974,72
16-Mar-09	339,6	63,5	975,29
15-Mar-09	339,6	63,5	986,21
14-Mar-09	339,7	63,5	1010,44
13-Mar-09	339,8	63,5	1028,95
12-Mar-09	339,9	63,6	987,56
11-Mar-09	340,0	62,3	1009,31
10-Mar-09	337,4	46,5	1054,95
23-Nov-08	357,3	53,5	1034,20
22-Nov-08	357,3	56,8	1023,77
21-Nov-08	357,3	63,8	975,17
20-Nov-08	345,4	71,9	955,55
19-Nov-08	335,4	71,9	940,80
18-Nov-08	336,1	71,9	971,51
17-Nov-08	318,9	71,9	936,89
16-Nov-08	323,3	71,9	895,82
15-Nov-08	335,5	71,9	979,04
14-Nov-08	334,6	71,9	955,41
13-Nov-08	334,2	71,9	945,76
12-Nov-08	332,9	71,9	968,35
11-Nov-08	329,8	71,9	962,30
10-Nov-08	327,7	71,9	928,67
09-Nov-08	327,5	71,9	965,11
08-Nov-08	328,5	71,9	1017,92
07-Nov-08	327,9	71,9	993,55
05-Nov-08	329,1	69,4	993,58
04-Nov-08	298,7	68,5	1019,14
03-Nov-08	324,1	68,5	913,77
02-Nov-08	372,3	68,5	936,00
01-Nov-08	373,0	68,5	943,26
31-Out-08	372,7	68,5	941,40
30-Out-08	372,3	68,5	927,43

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010 -
(Continuação)

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)		Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
29-Out-08	373,5	68,5	937,16	21-Jun-08	327,6	65,4	962,09
28-Out-08	373,5	68,5	929,21	20-Jun-08	324,1	65,4	950,30
27-Out-08	371,3	68,5	900,86	19-Jun-08	317,6	65,4	975,22
26-Out-08	371,7	68,5	958,85	18-Jun-08	314,6	65,4	901,87
25-Out-08	372,4	68,5	934,64	17-Jun-08	313,2	65,4	972,35
24-Out-08	371,6	68,5	901,12	16-Jun-08	315,0	65,4	969,14
23-Out-08	371,4	68,5	923,03	15-Jun-08	316,3	65,4	968,74
22-Out-08	369,8	68,5	938,76	14-Jun-08	317,6	65,4	968,58
21-Out-08	365,0	68,5	925,71	13-Jun-08	345,4	65,4	921,30
20-Out-08	360,8	68,5	921,32	12-Jun-08	353,9	65,4	1004,03
19-Out-08	361,5	68,5	930,61	11-Jun-08	361,5	63,6	945,24
18-Out-08	361,0	68,5	916,10	10-Jun-08	361,3	61,9	955,76
17-Out-08	360,7	68,5	941,76	09-Jun-08	361,0	58,0	937,33
16-Out-08	360,6	68,5	928,51	08-Jun-08	361,1	58,0	956,38
15-Out-08	360,9	68,5	960,75	07-Jun-08	361,0	58,0	948,48
14-Out-08	366,1	68,5	951,86	06-Jun-08	361,4	52,7	940,83
13-Out-08	373,1	68,5	914,92	05-Jun-08	360,7	56,2	961,53
12-Out-08	374,7	68,5	904,48	04-Jun-08	360,9	56,0	1022,52
11-Out-08	374,6	68,5	956,14	03-Jun-08	361,3	57,6	970,18
10-Out-08	375,2	68,5	933,17	02-Jun-08	367,7	57,6	962,27
09-Out-08	374,7	68,5	916,22	01-Jun-08	362,7	57,6	972,46
08-Out-08	372,3	68,5	925,37	31-Mai-08	362,6	57,6	950,37
07-Out-08	370,0	68,5	947,77	30-Mai-08	361,6	57,6	1008,62
06-Out-08	358,2	68,5	949,80	29-Mai-08	360,1	57,6	977,08
05-Out-08	350,4	68,5	910,74	28-Mai-08	358,5	57,6	969,10
04-Out-08	350,8	68,5	945,54	27-Mai-08	358,3	57,6	948,69
03-Out-08	351,0	68,5	913,72	26-Mai-08	355,2	57,6	959,94
02-Out-08	335,0	68,5	952,90	25-Mai-08	353,2	57,6	968,43
01-Out-08	321,3	68,5	1003,31	24-Mai-08	352,9	57,6	940,05
30-Sep-08	321,4	68,2	964,43	23-Mai-08	352,7	57,6	953,71
29-Sep-08	314,9	67,9	989,04	22-Mai-08	353,1	57,6	946,64
28-Sep-08	309,7	67,5	1009,23	21-Mai-08	353,1	57,7	944,76
27-Sep-08	349,2	63,7	931,64	20-Mai-08	350,6	57,6	950,53
26-Sep-08	354,3	61,8	957,71	19-Mai-08	349,1	57,6	939,78
25-Sep-08	314,5	61,9	972,72	18-Mai-08	348,1	57,6	975,93
24-Sep-08	327,2	61,1	893,61	17-Mai-08	348,3	57,6	953,24
23-Sep-08	370,2	51,0	974,62	16-Mai-08	348,7	57,6	951,98
29-Jun-08	372,8	53,5	963,34	15-Mai-08	348,0	57,6	956,88
28-Jun-08	373,7	56,8	971,77	14-Mai-08	344,6	57,6	957,43
27-Jun-08	372,9	63,5	969,42	13-Mai-08	345,4	57,6	969,79
26-Jun-08	348,2	65,4	935,71	12-Mai-08	348,2	56,0	953,84
25-Jun-08	329,5	65,4	970,49	11-Mai-08	347,8	55,3	955,67
24-Jun-08	330,0	65,4	963,16	10-Mai-08	336,1	55,3	985,01
23-Jun-08	328,2	65,4	964,25	09-Mai-08	348,5	55,3	960,38
22-Jun-08	327,5	65,4	956,02	08-Mai-08	347,8	55,3	952,87

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010 -
(Continuação)

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
07-Mai-08	333,1	55,3	974,46
06-Mai-08	316,6	55,3	984,92
05-Mai-08	314,5	54,3	1024,28
04-Mai-08	313,2	53,8	927,66
03-Mai-08	313,8	53,8	1032,84
02-Mai-08	315,1	53,8	1002,55
01-Mai-08	315,5	53,8	1007,92
30-Abr-08	315,0	53,8	1001,64
29-Abr-08	321,1	53,8	1018,16
27-Abr-08	354,4	53,8	971,34
26-Abr-08	354,4	53,8	980,27
25-Abr-08	354,4	53,8	977,61
24-Abr-08	354,6	53,8	984,53
21-Abr-08	355,6	51,7	1012,70
20-Abr-08	355,1	51,7	1006,22
19-Abr-08	355,1	54,4	986,92
18-Abr-08	354,8	55,8	971,97
17-Abr-08	355,2	55,8	962,17
16-Abr-08	355,4	54,5	962,51
15-Abr-08	352,0	53,8	976,82
14-Abr-08	345,0	52,0	1001,84
13-Abr-08	340,6	52,2	1008,79
12-Abr-08	341,3	52,2	1019,49
11-Abr-08	341,7	52,2	1003,85
10-Abr-08	340,8	51,9	1015,08
09-Abr-08	340,3	51,0	1000,86
08-Abr-08	358,2	51,1	996,03
07-Abr-08	368,8	51,1	968,31
07-Abr-08	368,8	51,1	968,31
06-Abr-08	356,9	51,1	958,29
05-Abr-08	357,5	51,1	986,28
04-Abr-08	357,2	49,9	979,78
03-Abr-08	355,9	43,8	979,32
02-Abr-08	352,5	44,3	1061,61
19-Jan-08	381,4	49,9	999,53
18-Jan-08	380,3	51,1	978,08
17-Jan-08	380,0	51,7	988,16
16-Jan-08	381,8	51,7	996,95
15-Jan-08	361,8	50,9	999,89
13-Jan-08	333,9	49,3	1034,79
12-Jan-08	334,2	49,3	1027,83
11-Jan-08	333,7	49,3	1042,74
10-Jan-08	333,2	49,3	681,15
09-Jan-08	333,1	49,3	1023,52
08-Jan-08	331,2	49,3	1015,48
07-Jan-08	324,0	49,3	1016,18

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
06-Jan-08	322,7	49,3	1048,51
05-Jan-08	324,1	49,3	1030,36
04-Jan-08	323,5	48,9	1047,93
03-Jan-08	320,7	48,0	1047,90
02-Jan-08	309,9	48,9	1025,75
01-Jan-08	306,9	50,5	1084,96
31-Dez-07	307,6	53,9	1013,21
30-Dez-07	306,8	53,9	1024,74
29-Dez-07	307,5	53,9	1027,9
28-Dez-07	306,9	53,9	1016,8
27-Dez-07	306,8	53,9	1021,3
26-Dez-07	311,6	54,5	1020,1
25-Dez-07	310,9	53,0	997,9
24-Dez-07	310,6	56,8	997,6
23-Dez-07	311,3	58,1	977,2
22-Dez-07	311,0	58,1	1032,8
21-Dez-07	311,5	58,1	997,9
20-Dez-07	310,3	58,1	1006,9
19-Dez-07	308,2	58,1	1010,6
18-Dez-07	318,6	58,1	1025,8
17-Dez-07	335,8	58,1	991,3
16-Dez-07	337,3	58,1	992,0
15-Dez-07	337,3	58,1	978,7
14-Dez-07	337,3	58,1	976,4
13-Dez-07	338,2	58,1	967,7
12-Dez-07	338,0	58,1	971,2
11-Dez-07	335,9	58,1	958,3
10-Dez-07	334,2	58,1	969,9
09-Dez-07	330,9	58,1	973,8
08-Dez-07	330,8	58,1	977,2
07-Dez-07	330,2	58,1	980,0
06-Dez-07	338,3	58,1	969,6
05-Dez-07	354,1	58,1	965,9
04-Dez-07	351,4	58,1	964,6
03-Dez-07	350,1	58,1	975,0
02-Dez-07	348,8	58,1	967,1
01-Dez-07	348,6	58,1	966,6
30-Nov-07	348,6	58,1	954,4
29-Nov-07	346,0	58,1	956,4
28-Nov-07	345,7	58,1	967,8
27-Nov-07	349,3	58,1	968,29
26-Nov-07	357,9	58,1	960,64
25-Nov-07	358,4	58,1	970,01
24-Nov-07	358,1	58,1	980,09
23-Nov-07	358,0	58,1	970,80
22-Nov-07	356,9	58,1	974,25

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010 -

(Continuação)

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)		Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
21-Nov-07	356,3	58,1	976,99	05-Set-06	350,1	50,5	958,85
20-Nov-07	355,1	58,1	955,25	04-Set-06	349,6	50,5	948,28
19-Nov-07	354,8	58,1	957,42	03-Set-06	349,2	50,5	957,50
18-Nov-07	353,2	58,1	966,23	02-Set-06	350,0	50,5	957,93
17-Nov-07	353,0	58,1	957,49	01-Set-06	348,5	50,5	959,09
16-Nov-07	353,4	58,1	942,13	31-Ago-06	356,1	50,5	942,35
15-Nov-07	339,4	58,1	946,02	30-Ago-06	363,0	50,5	929,17
14-Nov-07	294,9	58,1	1044,19	29-Ago-06	360,3	50,5	890,97
13-Nov-07	385,6	58,1	928,02	28-Ago-06	357,0	50,5	313,64
12-Nov-07	378,9	56,3	959,22	27-Ago-06	355,4	50,5	935,03
11-Nov-07	371,6	55,4	943,25	26-Ago-06	354,6	50,5	937,10
10-Nov-07	371,1	51,0	951,96	25-Ago-06	354,8	50,5	943,62
09-Nov-07	371,0	48,8	953,26	24-Ago-06	351,6	50,5	928,88
08-Nov-07	371,8	54,3	976,52	23-Ago-06	350,0	50,5	955,71
07-Nov-07	360,4	49,0	933,66	22-Ago-06	348,5	50,5	927,01
06-Nov-07	345,0	46,5	1005,61	21-Ago-06	343,6	50,5	961,64
06-Nov-07	327,7	71,1	968,19	20-Ago-06	344,1	50,5	956,04
07-Out-06	358,2	47,7	966,71	19-Ago-06	344,0	50,5	960,22
06-Out-06	359,2	54,4	957,88	18-Ago-06	342,9	50,5	939,15
04-Out-06	352,6	55,6	955,83	17-Ago-06	350,3	56,1	943,20
03-Out-06	358,1	56,0	934,26	16-Ago-06	364,7	57,6	904,67
02-Out-06	358,2	56,2	931,14	15-Ago-06	363,8	57,6	913,01
01-Out-06	365,4	56,2	919,55	14-Ago-06	365,1	57,6	918,74
30-Set-06	364,3	56,2	919,82	13-Ago-06	365,3	57,6	910,78
29-Set-06	364,3	56,2	924,50	12-Ago-06	364,9	57,6	906,01
28-Set-06	364,2	56,2	921,50	11-Ago-06	367,3	57,0	910,18
27-Set-06	364,9	55,9	935,96	10-Ago-06	352,4	54,3	901,46
26-Set-06	354,6	52,5	921,37	09-Ago-06	319,7	51,3	953,41
25-Set-06	334,3	51,7	963,62	08-Ago-06	319,0	51,1	965,38
24-Set-06	334,5	51,7	984,68	07-Ago-06	317,7	51,1	943,51
23-Set-06	334,8	51,7	957,57	06-Ago-06	316,1	51,1	965,59
22-Set-06	333,2	51,7	962,79	05-Ago-06	315,1	51,1	955,89
21-Set-06	332,7	51,7	974,12	04-Ago-06	316,3	51,1	961,89
20-Set-06	335,2	51,7	963,87	03-Ago-06	315,9	51,1	972,53
19-Set-06	337,1	51,7	951,78	02-Ago-06	328,9	51,1	971,44
18-Set-06	345,9	51,7	943,54	01-Ago-06	351,6	53,5	935,33
17-Set-06	360,3	51,7	938,56	31-Jul-06	351,1	53,5	927,41
16-Set-06	360,7	51,7	941,76	30-Jul-06	352,1	54,2	936,72
15-Set-06	361,0	51,3	934,24	29-Jul-06	352,5	54,6	910,85
14-Set-06	360,7	52,1	927,10	28-Jul-06	352,2	54,6	916,61
13-Set-06	360,2	52,9	921,72	27-Jul-06	353,3	54,6	907,16
12-Set-06	354,9	50,5	936,19	26-Jul-06	354,4	54,6	908,17
11-Set-06	346,3	50,5	944,67	25-Jul-06	355,0	54,6	919,93
10-Set-06	344,4	50,5	952,86	24-Jul-06	354,1	54,6	927,13
09-Set-06	343,7	50,5	957,63	23-Jul-06	350,9	54,6	930,80
09-Set-06	344,1	50,5	940,40	22-Jul-06	350,4	54,6	940,00
07-Set-06	342,0	50,5	938,96	21-Jul-06	351,8	54,6	920,65
06-Set-06	341,5	50,5	946,92				

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010 -
(Continuação)

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
20-Jul-06	347,3	54,6	924,06
19-Jul-06	340,0	54,6	928,88
18-Jul-06	334,5	54,6	925,87
17-Jul-06	326,6	54,6	934,34
16-Jul-06	325,6	54,6	940,19
15-Jul-06	325,4	54,6	951,81
14-Jul-06	325,4	54,6	940,85
13-Jul-06	328,9	54,6	942,02
12-Jul-06	333,7	54,2	950,57
11-Jul-06	336,2	53,1	937,28
10-Jul-06	338,4	54,6	919,56
08-Jul-06	338,5	54,6	921,22
07-Jul-06	339,5	53,5	917,23
06-Jul-06	336,5	53,5	929,11
05-Jul-06	327,3	49,2	917,99
04-Jul-06	325,2	46,3	988,50
25-Abr-06	359,1	45,4	1001,76
24-Abr-06	358,6	47,7	962,91
23-Abr-06	358,0	51,8	954,51
22-Abr-06	358,1	52,2	926,87
21-Abr-06	356,9	52,9	950,14
20-Abr-06	357,6	52,9	927,52
19-Abr-06	357,6	52,9	928,23
18-Abr-06	355,8	52,9	932,51
17-Abr-06	358,3	52,9	922,15
16-Abr-06	362,4	52,9	936,02
15-Abr-06	361,5	52,9	924,27
14-Abr-06	361,8	52,9	917,73
13-Abr-06	361,5	52,9	943,98
12-Abr-06	361,0	54,0	931,39
11-Abr-06	362,3	54,6	948,25
10-Abr-06	358,7	54,6	929,80
09-Abr-06	353,4	54,6	951,95
08-Abr-06	354,2	54,6	941,15
07-Abr-06	353,0	54,6	946,46
06-Abr-06	353,9	54,6	945,12
05-Abr-06	354,3	54,6	927,19
04-Abr-06	351,2	54,6	923,90
03-Abr-06	345,5	54,6	934,68
02-Abr-06	325,8	54,6	977,74
01-Abr-06	325,9	54,6	956,24
31-Mar-06	326,8	54,6	951,15
30-Mar-06	334,8	54,6	959,33
29-Mar-06	353,2	54,6	932,56
28-Mar-06	352,8	54,6	929,91
27-Mar-06	354,3	54,6	939,15
26-Mar-06	356,3	54,6	900,94

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
25-Mar-06	355,7	54,6	945,26
24-Mar-06	355,2	54,6	934,50
23-Mar-06	334,0	54,6	970,35
22-Mar-06	351,9	54,6	939,51
21-Mar-06	348,1	54,6	968,94
20-Mar-06	344,7	54,6	953,47
19-Mar-06	341,4	54,6	946,04
18-Mar-06	341,4	54,6	963,40
17-Mar-06	341,1	54,6	938,13
16-Mar-06	339,7	52,3	943,59
15-Mar-06	337,8	52,3	958,48
14-Mar-06	339,9	52,3	965,58
13-Mar-06	347,6	52,3	912,60
12-Mar-06	351,0	52,3	929,10
11-Mar-06	351,3	52,3	946,92
10-Mar-06	352,2	52,3	966,17
09-Mar-06	349,9	53,1	952,66
08-Mar-06	357,1	54,6	935,03
07-Mar-06	354,4	54,6	926,62
06-Mar-06	351,5	58,5	936,94
05-Mar-06	348,5	54,6	957,76
04-Mar-06	348,2	54,6	949,46
03-Mar-06	349,4	54,6	933,29
02-Mar-06	348,6	54,6	942,78
01-Mar-06	343,7	54,6	929,60
28-Fev-06	341,7	54,6	969,80
27-Fev-06	341,6	54,6	972,57
26-Fev-06	341,3	54,6	960,59
26-Fev-06	341,0	54,6	952,49
24-Fev-06	340,5	54,6	962,83
23-Fev-06	341,0	54,6	962,40
22-Fev-06	344,0	54,6	972,12
21-Fev-06	349,5	54,6	975,48
20-Fev-06	354,3	54,6	976,77
19-Fev-06	354,4	54,6	976,02
18-Fev-06	353,5	54,6	937,74
17-Fev-06	353,9	54,6	947,69
16-Fev-06	353,7	54,6	964,38
15-Fev-06	351,7	54,6	951,66
14-Fev-06	348,6	54,6	951,82
13-Fev-06	342,4	54,6	975,20
12-Fev-06	337,7	54,6	980,23
11-Fev-06	337,6	54,4	971,07
10-Fev-06	337,5	54,7	978,41
09-Fev-06	337,5	55,1	955,80
08-Fev-06	337,7	55,1	950,23
07-Fev-06	336,8	55,1	979,29

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010 -
(Continuação)

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
06-Fev-06	340,1	55,1	974,89
05-Fev-06	342,1	55,1	977,06
04-Fev-06	342,6	55,1	977,52
03-Fev-06	343,3	55,1	979,51
02-Fev-06	330,2	55,1	986,76
01-Fev-06	317,1	55,1	995,71
31-Jan-06	328,4	55,1	976,55
30-Jan-06	355,0	55,1	975,93
29-Jan-06	359,1	55,1	979,01
28-Jan-06	360,7	55,1	951,45
27-Jan-06	362,0	55,1	964,21
26-Jan-06	361,9	55,1	939,26
25-Jan-06	356,4	55,1	930,50
24-Jan-06	354,2	55,1	953,60
23-Jan-06	357,2	55,1	949,84
22-Jan-06	363,0	55,1	961,84
21-Jan-06	364,0	55,1	948,69
20-Jan-06	362,9	55,1	943,13
19-Jan-06	360,0	55,1	964,58
18-Jan-06	355,4	55,1	947,08
17-Jan-06	354,7	55,1	970,36
16-Jan-06	355,9	55,1	970,64
15-Jan-06	355,6	55,1	963,69
14-Jan-06	355,4	55,1	965,02
13-Jan-06	356,6	59,9	953,96
12-Jan-06	353,7	54,6	949,30
11-Jan-06	352,4	51,7	964,22
10-Jan-06	349,6	46,3	1024,89
09-Out-05	352,4	47,8	988,63
08-Out-05	352,0	47,8	962,37
07-Out-05	351,8	47,7	971,13
06-Out-05	350,6	47,7	950,12
05-Out-05	349,2	48,4	980,27
04-Out-05	349,2	51,6	980,27
03-Out-05	353,9	48,4	970,34
02-Out-05	365,2	50,9	974,31
01-Out-05	366,7	50,9	962,23
30-Sep-05	362,0	49,1	952,89
29-Sep-05	353,1	49,8	975,01
28-Sep-05	352,0	49,8	971,88
27-Sep-05	349,2	49,8	958,63
26-Sep-05	346,5	50,5	953,74
25-Sep-05	338,7	50,5	969,58
24-Sep-05	338,4	50,5	984,95
23-Sep-05	339,9	50,5	1024,67
22-Sep-05	339,3	50,5	973,53
21-Sep-05	338,3	50,5	969,06

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
20-Sep-05	339,3	52,3	948,92
19-Sep-05	341,6	48,5	971,88
18-Sep-05	342,3	48,5	971,00
17-Sep-05	341,8	48,5	978,85
16-Sep-05	341,7	49,2	978,68
15-Sep-05	342,5	49,2	941,26
14-Sep-05	336,3	49,2	972,53
13-Sep-05	324,8	47,8	974,53
12-Sep-05	322,5	47,8	980,68
11-Sep-05	317,0	47,8	986,89
10-Sep-05	317,4	47,8	983,76
09-Sep-05	317,9	47,8	976,72
08-Sep-05	317,8	47,8	998,66
07-Sep-05	321,2	47,8	980,33
06-Sep-05	330,4	47,8	968,42
05-Sep-05	330,2	47,8	967,46
04-Sep-05	331,0	47,8	964,52
03-Sep-05	329,9	47,8	970,16
02-Sep-05	329,3	47,8	964,34
01-Sep-05	327,7	47,8	958,50
31-Ago-05	328,1	47,8	977,40
30-Ago-05	325,0	47,8	967,80
29-Ago-05	314,7	47,8	989,40
28-Ago-05	310,6	47,8	994,21
27-Ago-05	310,7	47,8	978,65
26-Ago-05	310,7	47,8	991,01
25-Ago-05	312,8	47,8	984,19
24-Ago-05	320,5	47,8	981,05
23-Ago-05	318,6	47,8	985,86
22-Ago-05	318,4	47,0	994,82
21-Ago-05	318,1	47,0	976,10
20-Ago-05	317,9	47,0	974,08
19-Ago-05	320,3	47,0	976,19
18-Ago-05	314,6	47,0	975,06
17-Ago-05	302,8	47,0	995,58
16-Ago-05	317,5	47,0	989,40
15-Ago-05	345,9	47,0	967,45
14-Ago-05	346,7	47,0	955,08
13-Ago-05	345,7	47,0	954,24
12-Ago-05	347,0	47,0	964,61
11-Ago-05	347,4	47,0	968,43
10-Ago-05	347,4	47,0	965,74
09-Ago-05	349,7	45,5	967,22
07-Mai-05	354,9	41,8	974,30
06-Mai-05	354,6	42,6	981,78
05-Mai-05	348,7	42,6	989,96
04-Mai-05	354,3	40,8	967,25

Tabela VII-17- Dados de produtividade média diária, % de casco e consumo específico entre 2005 e 2010 -
(Continuação)

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
03-Mai-05	333,9	40,8	985,24
02-Mai-05	258,7	40,8	1135,81
01-Mai-05	315,2	40,8	1008,39
30-Abr-05	315,5	40,8	1018,65
29-Abr-05	316,5	45,9	989,21
28-Abr-05	317,8	42,6	991,41
27-Abr-05	321,5	45,8	995,59
26-Abr-05	320,9	45,8	980,60
25-Abr-05	320,7	45,8	1008,64
24-Abr-05	321,7	45,8	1005,83
23-Abr-05	319,8	45,8	1005,99
22-Abr-05	323,5	45,8	1009,18
21-Abr-05	328,2	45,8	977,79
20-Abr-05	328,0	45,8	990,24
19-Abr-05	328,0	45,8	964,75
18-Abr-05	327,9	45,8	994,07
17-Abr-05	327,5	44,2	1000,75
16-Abr-05	327,8	44,2	1002,95
15-Abr-05	327,8	44,2	998,94
14-Abr-05	327,2	44,2	1000,82
13-Abr-05	326,4	44,2	991,71
12-Abr-05	325,1	44,2	1003,14
11-Abr-05	321,9	44,2	994,40
10-Abr-05	319,3	44,2	1010,88
09-Abr-05	319,1	44,2	1012,61
08-Abr-05	320,2	44,6	988,40
07-Abr-05	322,8	44,6	995,04
06-Abr-05	331,4	43	1023,76
05-Abr-05	331,6	43	997,55
04-Abr-05	333,7	43,4	1006,11
03-Abr-05	339,5	39,4	1000,12
02-Abr-05	339,4	39,4	988,91
01-Abr-05	339,1	39,4	1000,52
31-Mar-05	339,7	35,4	983,17
30-Mar-05	338,4	35,4	1014,83
29-Mar-05	338,4	32,6	1019,82
28-Mar-05	313,2	32,6	1028,45
27-Mar-05	313,6	32,6	1002,72
26-Mar-05	313,6	32,6	1036,82
25-Mar-05	313,2	32,6	1028,45
24-Mar-05	314,4	32,6	1049,26
23-Mar-05	310,1	32,6	1037,83
22-Mar-05	302,9	32,6	1057,82
21-Mar-05	303,8	31,3	1046,95
20-Mar-05	302,8	34,3	1057,13
19-Mar-05	302,5	39,5	1051,74
18-Mar-05	302,5	39,5	1045,63

	Tiragem (t/dia)	% casco	Consumo específico (kcal/kg)
17-Mar-05	306,1	39,5	1026,66
16-Mar-05	314,1	39,5	1039,82
15-Mar-05	313,1	37,5	1025,78
14-Mar-05	310,6	37,5	1025,66
13-Mar-05	310,7	37,5	1034,69
12-Mar-05	311,8	37,5	1036,04
11-Mar-05	310,5	37,5	1029,01
10-Mar-05	311,9	37,5	1052,92
09-Mar-05	313,6	37,5	1013,82
08-Mar-05	313,7	37,5	1044,47
07-Mar-05	314,2	37,5	1026,54
06-Mar-05	313,1	37,5	1028,33
05-Mar-05	313,7	37,5	1038,78
04-Mar-05	319,9	35,4	1009,47
03-Mar-05	327,9	35,4	1018,58
02-Mar-05	327,9	35,4	1015,85
01-Mar-05	325,5	35,4	1020,44
28-Fev-05	326,9	35,4	1034,23
27-Fev-05	330,9	35,4	991,46
26-Fev-05	330,8	35,4	1029,18
25-Fev-05	330,0	35,4	1028,18
24-Fev-05	330,9	35,4	1021,80
23-Fev-05	330,7	35,4	1035,49
22-Fev-05	325,6	35,4	1000,42

Anexo VIII – Análise dos consumos, produtividade diária e incorporação de casco entre 2000 e Fevereiro de 2010

Analisando os valores de consumo específico do forno entre 2000 e 2010 através da metodologia apresentada no capítulo 4 foi possível obter a Tabela IX-20, a partir da qual se criou o gráfico dos consumos.

Tabela VII- 18 – Consumos específicos médios de energia (kcal/kg de vidro VR) para as várias produtividades e incorporações de casco. Valores registados entre 2000 e 2010.

Consumos específicos médios	% Casco										Média
	20-24	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	
Tiragem											
245-249						1040					1040
250-254						1011					1011
255-259				1136							1136
260-264					1012						1012
265-269					985	971		996			984
275-274					985	963		980			973
280-284					990	971		962			972
285-289						965		962			965
290-294		1002				960	970	935			969
295-299		990			1000	938	941	947	951	925	960
300-304		1033	1049		943	899	952	940	1055	1001	948
305-309		984	1027		952	959	945	943	1009	1008	960
310-314		1022	1017		967	946	942	913	957	988	968
315-319		965	989	998	972	959	1002	936	968	958	967
320-324		970	963	993	1003	935	912	959	955	936	963
325-329	896	966	1004	971	973	926	908	947	974	973	957
330-334		962	1021	1002	970	919	941		963	957	950
335-339		1020	998		928	929	947	959	919	952	941
340-344					932	942	931	960	886	955	938
345-349				990	974	941	940	981	940	956	948
350-354				981	959	938	933	939	958	932	941
355-359				979	978	928	941	872	974	922	933
360-364					943	932	938	936	905	881	926
365-369						947	914	939	920	896	925
370-374					929	952	942	945	930	936	935
375-379							935	952	957		947
380-384					1000	988	965	961	969		976
385-389							928				928
Média	896	995	1009	990	966	940	938	944	943	948	949

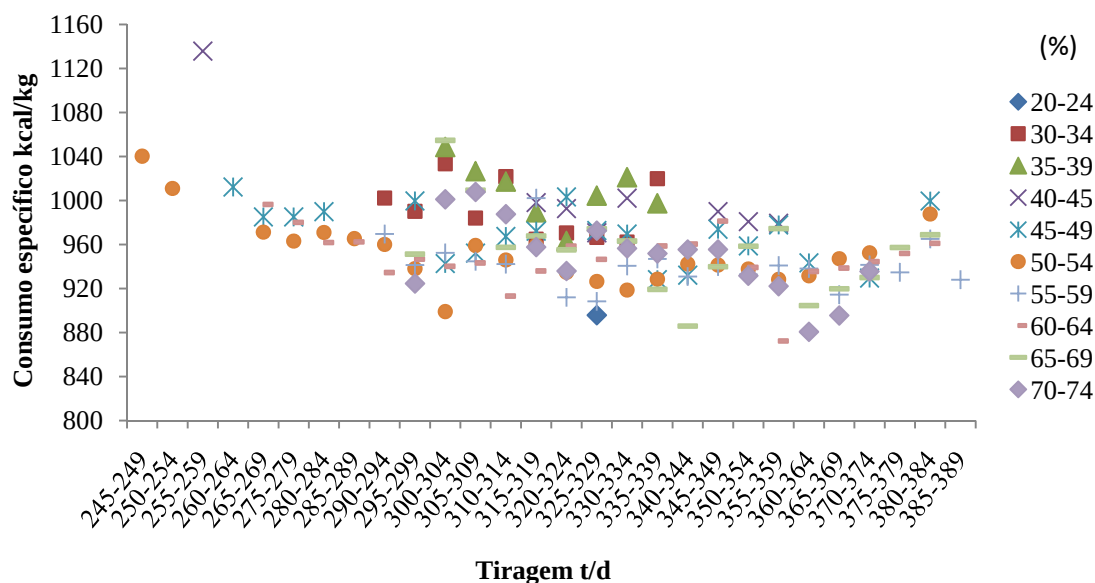


Figura VIII - 41 - Resumo do consumo específico relativamente à tiragem e à % de casco

A Figura VIII- 41 ilustra, para o período entre 2000 a Fevereiro de 2010, a relação entre o consumo específico total do AV5 em relação à produtividade diária, considerando diferentes incorporações de casco.

Como se pode ver, juntando os valores de consumo, tiragem e incorporação de casco desde 2000 o resultado não é tão visível como o apresentado para o período de 2005 a 2010, apresentado no capítulo 4. A tendência de diminuição não é clara como no outro caso, o que sugere uma evolução incorrecta nos consumos, por este motivo, a melhor solução em termos de consumo energético foi obtida a partir do gráfico apresentado no capítulo 4.

Anexo IX – Exemplo de análise ao consumo específico do forno em função da produtividade diária e da incorporação de casco

De seguida é apresentado um procedimento alternativo para a determinação de evolução dos consumos específicos do forno em função da produtividade e da incorporação de casco.

A análise tomou em consideração os valores de consumo específico de energia (gás natural e ajuda eléctrica), tiragem e incorporação de casco para o vidro verde-esmeralda (VR) durante o período de 2005 a 2009. Mais uma vez, a escolha deste período teve por base a maior estabilidade do forno.

Inicialmente, procedeu-se ao tratamento dos dados recebidos, de forma a obter apenas aqueles relativos à produção de vidro VR no AV5.

Os valores dos consumos energéticos registados reportam à produtividade diária e percentagem de casco incorporado, que neste caso variou entre 35-40%, 40-45%, até 70-75%.

Optou-se por dividir os dados pelas seguintes tiragens: 315, 330, 340, 350, 360, 370 e 380 t/dia. Esta divisão foi determinada por mim, através da análise dos valores que me foram apresentados, sendo estes escolhidos por se verificar que apresentavam uma maior ocorrência. Contudo, de modo a englobar uma maior quantidade de dados na separação por tiragem, optou-se por alargar $\pm 2,5$ valores a cada uma delas, isto é, a tiragem de 315 inclui valores entre 312,5 e 317,5 t/dia e assim sucessivamente para todas as produtividades consideradas.

De modo a atingir o objectivo visado, aplicou-se o seguinte procedimento no tratamento dos dados:

- I. Inicialmente foi necessário calcular o consumo específico do forno com base nos valores de consumo de gás natural e electricidade;

- II. Procedeu-se à separação dos dados pelas diferentes gamas de incorporação de casco (35-40%, 40-45%, até 70-75%);
- III. Após juntar os valores de iguais percentagens de casco, procedeu-se à separação por produtividades diárias. Também aqui é considerada uma pequena gama de valores de modo a conseguir alargar os dados considerados. Deste modo, a cada valor de produtividade considerado juntou-se uma variação de $\pm 2,5$ valores.
- IV. Tendo já conseguida a separação dos dados por gama de casco, e para cada uma destas feita a separação por tiragem, conseguiu-se obter os consumos específicos do forno respectivos aos dados e a partir destes foi possível determinar-se a média como é apresentado na Tabela IX-20 para a gama de incorporação de 65-70% de casco.

Tabela IX-19 – Resultado da separação obtida para uma incorporação de 65 a 70 % de casco

65-70 % Casco		
Tiragem (t/dia)	Consumo específico Kcal/kg	Média Consumo Específico (kcal/kg)
315 ±2,5	979	1026
	1052	
	1052	
	1049	
	1034	
	989	
330 ±2,5	977	985
	994	
340 ±2,5	948	948
350 ±2,5	952	949
	985	
	962	
	973	
	911	
	946	
	914	
360 ±2,5	999	944
	921	
	931	
	916	
	942	
	929	
	961	
370 ±2,5	950	935
	989	
	932	
	936	
	927	
	901	
	959	
	935	
	901	
	923	
	939	
	925	
	948	
380 ±2,5	976	969
	956	
	984	
	965	
	964	

V. Como resultado final, construir-se a Tabela IX-19 com os valores médios de consumo específico para cada tiragem e incorporação de casco.

Tabela IX-20 – Consumos específicos médios (Kcal / kg de vidro) para diferentes gamas de casco incorporado na fusão e diferentes valores de produtividades diárias (t/dia) entre 2005 e 2009

	Produtividade diária						
Casco	315±2,5	330 ±2,5	340 ±2,5	350 ±2,5	360 ±2,5	370 ±2,5	380 ±2,5
35-40 %	1031	1018	998	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
40-45 %	1014	1006	n.d.	990	n.d.	n.d.	n.d.
45-50 %	985	976	975	975	954	953	n.d.
50-55 %	986	969	966	946	950	978	988
55-60 %	967	977	964	967	970	962	958
60-65 %	957	965	988	974	961	963	952
65-70 %	1026	985	948	949	943	935	969
70-75 %	n.d.	973	n.d.	936	922	936	n.d.

n.d. não disponível pois para aquela tiragem não se verificou aquela incorporação de casco.

Por análise da Tabela IX-20 constata-se que para as tiragens analisadas (315 a 380 t/dia ±2,5) a o consumo específico varia entre 922 e 1031 Kcal/kg.

A melhor solução aqui encontrada refere-se ao consumo mínimo (922 kcal/kg), obtido para um tiragem de 360 ±2,5 t/dia e uma incorporação de 70-75% de casco.

Esta análise é útil no sentido em que apresenta de forma detalhada o processo efectuado para conseguir demonstrar a evolução o consumo específico do forno em função da produtividade, considerando diferentes incorporações de casco.

De seguida são apresentados individualmente cada uma das linhas de evolução de consumo específico médio obtido com os dados da Tabela IX-20. Importa referir que os valores das tiragens apresentam uma variação de ±2,5.

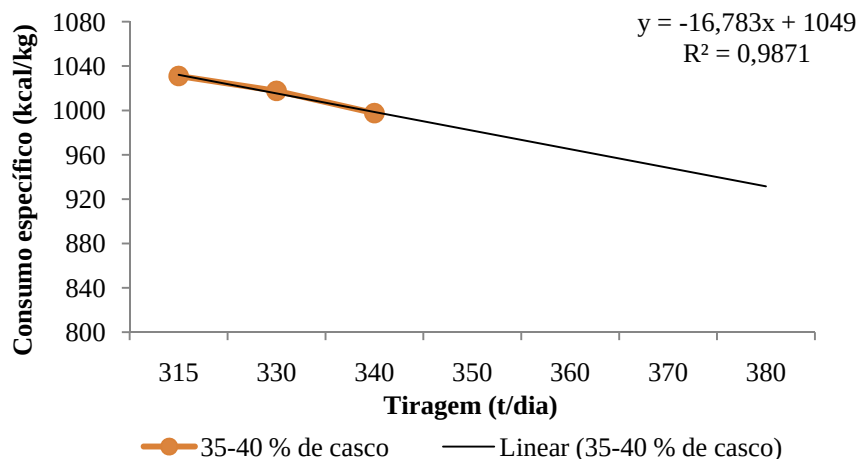


Figura IX- 42 – Evolução do consumo para uma incorporação de 35-40% de casco

A incorporação de casco de 35 a 40% foi aplicada a produtividades mais baixas, sendo representado na Figura VII - 37 apenas três pontos, correspondentes a 315, 330 e 340 t/dia. Estes valores de tiragem e incorporação de casco referem-se a períodos mais antigos no funcionamento do forno, neste caso a 2005. Apesar de reunidos apenas três pontos, verifica-se a diminuição do consumo com o aumento da tiragem.

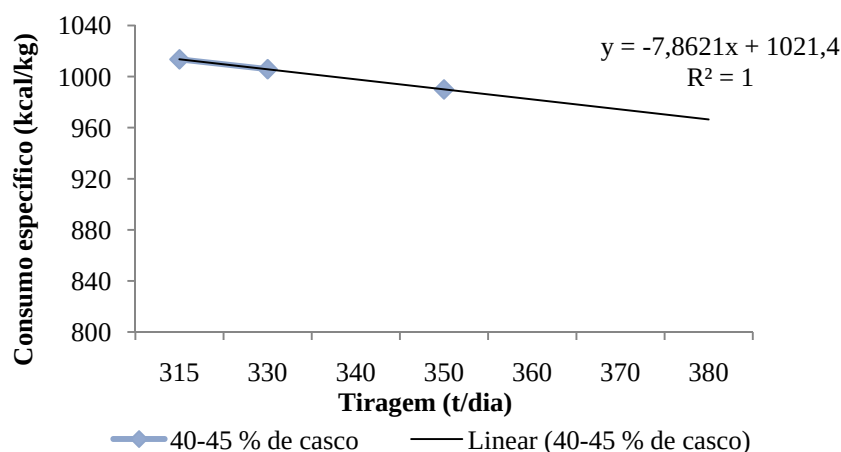


Figura IX -43- Evolução do consumo para uma incorporação de 40-45% de casco

Para a gama de 40-45% de casco foram igualmente obtidos apenas três pontos para as tiragens de 315, 330 e 350 t/dia, contudo a evolução por este apresentada é decrescente, como era esperado.

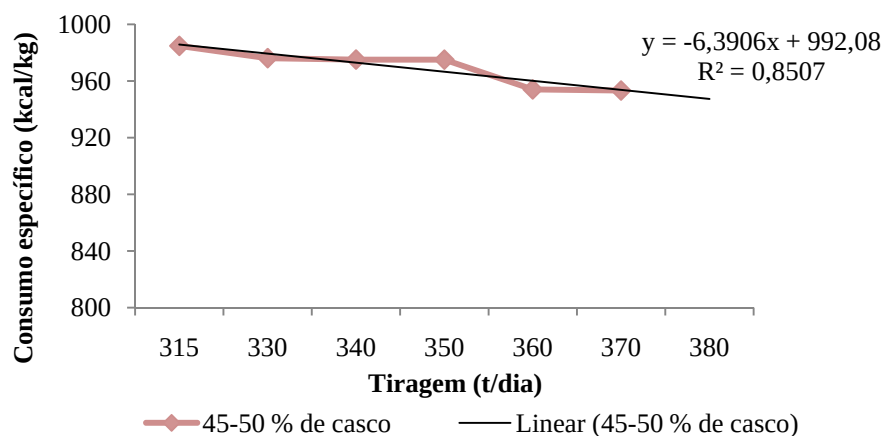


Figura IX - 44 - Evolução do consumo para uma incorporação de 45-50% de casco

A incorporação de 45-50% de casco já se verifica em quase todas as tiragens consideradas. É visível a tendência decrescente na evolução do consumo.

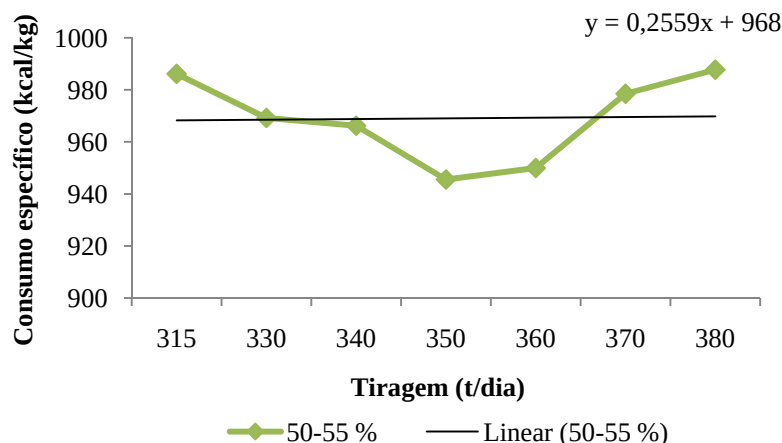


Figura IX -45 – Evolução do consumo para uma incorporação de 50-55% de casco

Para a gama de 50-55% a variação verificada no gráfico anterior não segue a tendência esperada, uma vez que a partir das 360 t/dia o consumo específico aumenta. Interferências no processo de produção do vidro, ou talvez erros na introdução dos valores na base de dados podem estar na origem do problema.

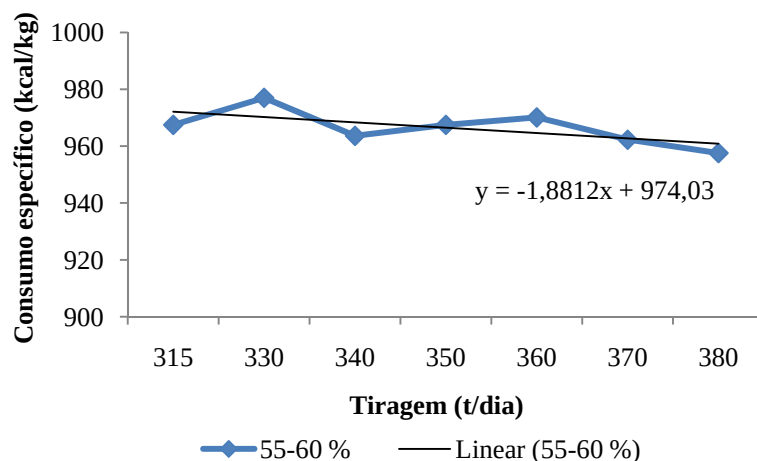


Figura IX -46 - Evolução do consumo para uma incorporação de 55-60% de casco

Para a gama de 55-60% de casco observa-se a diminuição do consumo com o aumento da tiragem. Deste gráfico, o melhor resultado encontrado é de 958 kcal/kg para 380 t/ dia de vidro produzido.

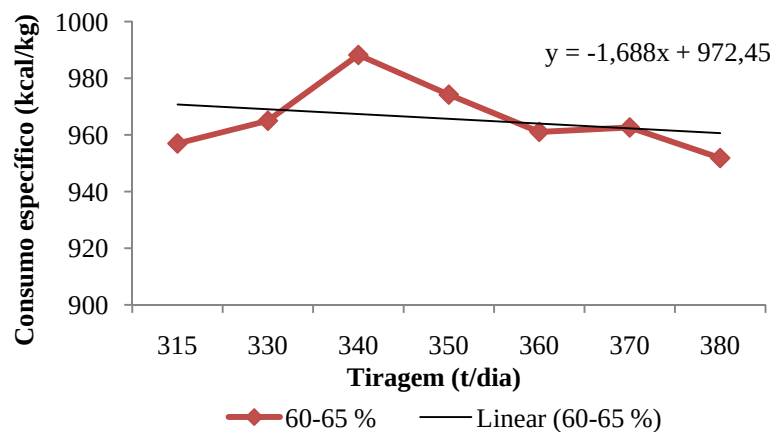


Figura IX - 437 - Evolução do consumo para uma incorporação de 60-65% de casco

Para 60-65% de casco a tendência não é nítida, contudo o melhor resultado continua a ser para uma tiragem de 380 t/dia, à qual corresponde um consumo específico de 952 kcal/kg.

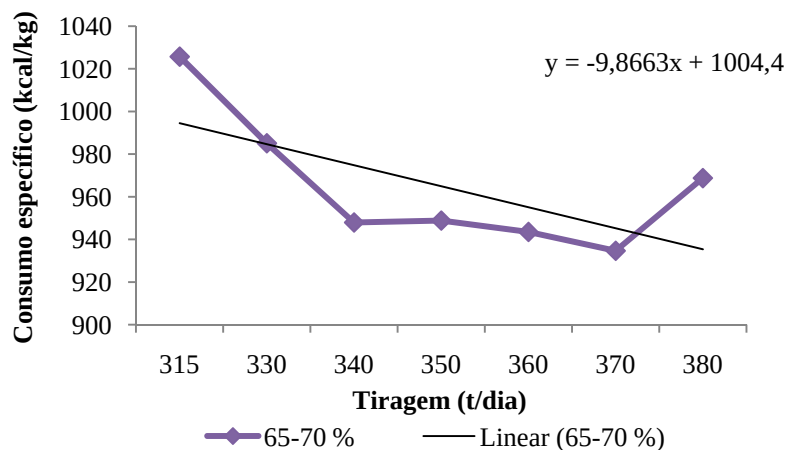


Figura IX - 448 - Evolução do consumo para uma incorporação de 65-70% de casco

Para 65-70% de casco pode observar-se a diminuição do consumo até uma tiragem de 370 t/dia. O valor correspondente à produtividade de 380 t/dia não vai de encontro ao esperado e é contrário à evolução até ali verificada, o que é um indício de que existe um erro associado ao valor. O melhor resultado neste caso é para uma tiragem de 370 t/dia e corresponde a um consumo de 935 kcal/kg.

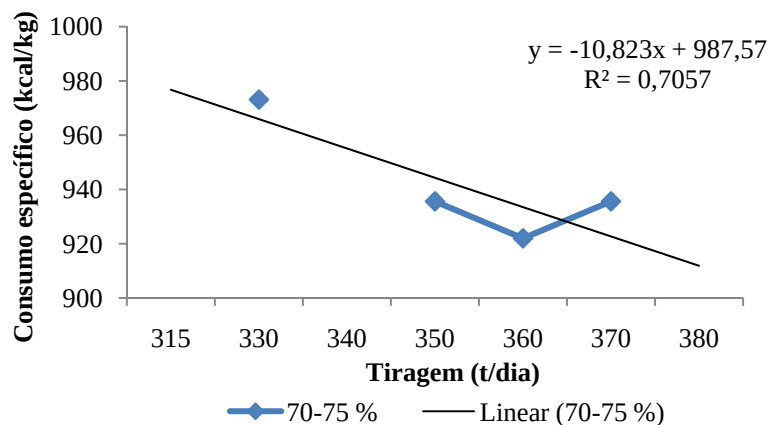


Figura IX -49 - Consumo específico por tiragem para 70-75% de casco

Afigura IX-49 ilustra a melhor solução encontrada na análise, consumo de 922 kcal/kg, para uma produtividade de 360 t/dia e 70 a 75% de incorporação de casco. Também aqui se observa que a partir das 360 t/dia o consumo específico do forno começa a crescer, o que pode representar uma anomalia no processo de produção.