

Universidade de Évora

Mestrado em Engenharia Química

A Reactividade do Clínquer



Estagiária: Vanessa Carole Mestre Gasparinho

Orientadores externos: Engenheiro Hélio Viero e Engenheira Carla Alexandre

Orientadores internos: Professor Doutor António Candeias e Professor Doutor José Mirão

Évora, Abril de 2009

Universidade de Évora

Cimpor – Centro de Produção de Loulé

A Reactividade do Clínquer

Estagiária: Vanessa Carole Mestre Gasparinho

Orientadores externos: Engenheiro Hélio Viero e Engenheira Carla Alexandre
Orientadores internos: Professor Doutor António Candeias e Professor Doutor José Mirão



Estágio curricular para obtenção do mestrado em Engenharia Química, realizado na Cimpor

Évora, Abril de 2009



Agradecimentos

Não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que voluntaria ou involuntariamente permitiram a realização deste trabalho.

☺ Em primeiro lugar a minha enorme gratidão ao meu orientador na Cimpor, o Eng.º Hélio Viero, Director Fabril do Centro de Produção de Loulé, que me permitiu realizar o estágio que ambicionava e ter contacto directo com a indústria cimenteira.

☺ À minha coordenadora na Cimpor, a Eng.ª Carla Alexandre, Coordenadora da Área de Fabricação e Embalagem, pela orientação e transmissão de conhecimentos que por muito que procurasse só ela tinha a resposta.

☺ Ao Professor Doutor António Candeias e ao Professor Doutor José Mirão meus orientadores na Universidade de Évora pela ajuda, sugestões, apoio e boa disposição sempre presentes.

☺ Aos técnicos de laboratório, Sr. Neto, Sr. Barracha, Sr. Polana, Sr. Mealha, Benvindo e João pela forma “estonteante” como me receberam, pela prontidão em ajudar e esclarecer dúvidas e principalmente pela capacidade que têm em tornar tudo muito mais fácil, estou profundamente agradecida.

☺ À minha colega de estágio, Cláudia Lopes pelo incentivo dado ao longo destes meses de trabalho e também pela amizade e boa disposição compartilhadas, um muito obrigado.

☺ À minha melhor amiga Ana e ao meu namorado Rui Carromeu pela motivação, incentivo e principalmente muita paciência para ouvirem falar de cimento, um obrigado muito especial.

☺ Como não poderia deixar de ser, aos meus pais por tornarem tudo possível e conseguirem transpor todos os obstáculos para que me pudesse formar naquilo que queria. Com carinho, muito obrigado pela motivação e incentivo ao longo de todos estes anos.

Resumo

A indústria cimenteira é uma indústria com grandes gastos energéticos, sendo por isso de extrema importância, do ponto de vista económico, desenvolver estratégias e procedimentos que conduzam à sua minimização.

O intuito da realização do presente trabalho foi estudar a reactividade do clínquer da Cimpor – Centro de Produção de Loulé, ao introduzir alterações ao processo de fabrico de cimento. O estudo engloba três objectivos:

- ↳ Melhorar a qualidade do clínquer;
- ↳ Reduzir o consumo térmico do forno;
- ↳ Reduzir o consumo energético dos moinhos de cimento.

Na paragem de Maio de 2008 foi instalado um novo redutor para o motor do forno que permitiu alterar a velocidade máxima de 2 para 3,5 rpm, o que consequentemente diminuiu a taxa de enchimento de $\approx 20\%$ para $\approx 14\%$.

Os resultados mostraram que com a alteração ao processo atingiram-se dois dos três objectivos pretendidos. Isto é, obteve-se um clínquer de melhor qualidade e houve uma diminuição do consumo térmico do forno. Contudo, não se conseguiram tirar conclusões acerca do consumo energético dos moinhos de cimento, sendo para tal, necessário prolongar o tempo do estudo.

Abstract

(The reactivity of the clinker)

The cement industry is an industry with high energy costs and is therefore of extreme importance, in economic terms, to develop strategies and procedures that lead to its minimization.

The purpose of this work was to study the reactivity of the clinker produced at Loulé Cimpor Production Center by introducing changes in the manufacture process of cement. The study comprised three main objectives:

- ↳ Improving the quality of the clinker;
- ↳ Reducing the heat consumption of the furnace;
- ↳ Reducing energy consumption of the cement mills.

During the stop of May 2008 a new reducer was installed in the furnace motor which allowed changing the maximum speed of 2 to 3.5 rpm, which consequently decreased the rate of filling from $\approx 20\%$ to $\approx 14\%$.

The results showed that with the process modification, two of the three objectives were reached up. That is, a better quality of clinker was obtained and there was a decrease in the heat consumption of the furnace. However, during the period of this study it was not possible to draw a final conclusion about the energy consumption of the cement mills, and therefore, it is necessary to study the process for a longer period of time.

Índice Geral

1. Introdução	1
1.1. Estrutura do trabalho	2
2. Ligantes.....	5
2.1. Definição	5
2.2. Ligantes hidrófilos	5
2.2.1. Ligantes hidrófilos aéreos.....	5
2.2.1.1. Gesso	6
2.2.1.2. Cal aérea	6
2.2.2. Ligantes hidrófilos hidráulicos	6
2.2.2.1. Cal hidráulica	7
2.2.2.2. Cimento	7
2.3. Ligantes hidrófobos	8
3. Processo de fabrico do cimento.....	11
3.1. Introdução.....	11
3.2. Preparação do cru	11
3.3. Cozedura e arrefecimento	12
3.3.1. Equipamentos	14
3.3.1.1. Pré-aquecimento.....	14
3.3.1.1.1. Grelha de pré-aquecimento	14
3.3.1.1.2. Torre de pré-aquecimento	15
3.3.1.1.3. Pré-calcinador.....	17
3.3.1.2. Forno (tubo rotativo)	18
3.3.1.3. Arrefecedor	19
3.4. Adição de gesso e moagem	20

3.5. Ensilagem e expedição	21
4. Componentes principais do cru e do clínquer	25
4.1. Introdução.....	25
4.2. Componentes da matéria-prima.....	25
4.3. Componentes principais do clínquer.....	27
4.3.1. C ₃ S.....	27
4.3.2. C ₂ S.....	28
4.3.3. C ₃ A.....	28
4.3.4. C ₄ AF	28
4.4. Cálculo dos componentes principais do clínquer	29
4.5. Reacções no processo de fabrico do clínquer.....	30
4.5.1. Secagem.....	31
4.5.2. Decomposição das argilas	31
4.5.3. Decomposição dos carbonatos.....	31
4.5.4. Reacções em fase sólida	32
4.5.5. Reacções na presença de fase líquida.....	33
4.5.6. Reacções durante o arrefecimento	34
4.5.7. Presa, endurecimento e hidratação.....	35
5. Avaliação da qualidade do clínquer.....	41
5.1. Introdução.....	41
5.2. Composição química.....	41
5.2.1. Cal livre (CaO _{lv}).....	41
5.2.2. Óxido de magnésio (MgO).....	41
5.2.3. Óxido de enxofre (SO ₃).....	42

5.2.4. Álcalis (K_2O e Na_2O)	42
5.2.5. Cloretos (Cl)	42
5.3. Módulos e índices químicos	43
5.3.1. Módulo hidráulico.....	43
5.3.2. Módulo silicioso.....	43
5.3.3. Módulo aluminoso	44
5.3.4. Índice de saturação em cal.....	44
5.3.5. Fase líquida.....	45
5.3.6. Índice de cozedura	45
5.4. Indicadores Benchmarking	45
5.4.1. CUI (“Clinker Uniformity Index”)	45
5.4.2. KSUI (“Klin Sulphate Uniformity Index”)	46
5.4.3. FLUI (“Free Lime Uniformity Index”)	46
5.4.4. KFUI (“Klin Free Uniformity Index”).....	46
6. Ciclo dos álcalis.....	49
6.1. Introdução.....	49
6.2. Enxofre.....	49
6.3. Cloretos	50
6.4. Consequências da volatilização	51
7. Metodologia	55
7.1. Amostragem	56
7.1.1. Resumo do processo.....	56
7.1.2. Procedimento experimental	56
7.2. Determinação da perda ao fogo	56

7.2.1. Resumo do processo.....	56
7.2.2. Equipamentos e material	57
7.2.3. Procedimento experimental	57
7.2.4. Determinação da perda ao fogo	57
7.3. Determinação do teor em cal livre	58
7.3.1. Resumo do processo.....	58
7.3.2. Equipamentos, material e reagentes.....	58
7.3.3. Procedimento experimental	59
7.3.4. Determinação do teor em cal livre	59
7.4. Análise química por fluorescência de raios X.....	59
7.4.1. Resumo do processo.....	59
7.4.2. Equipamentos, material e reagentes.....	60
7.4.3. Procedimento experimental	60
7.4.4. Determinação da análise química	61
7.5. Determinação do teor em cloretos	61
7.5.1. Resumo do processo.....	61
7.5.2. Equipamentos, material e reagentes.....	62
7.5.3. Procedimento experimental	62
7.5.4. Determinação do teor em cloretos	63
7.6. Determinação do teor em sódio por fotometria de chama	63
7.6.1. Resumo do processo.....	63
7.6.2. Equipamentos, material e reagentes.....	64

7.6.3. Procedimento experimental	65
7.6.4. Determinação do teor em sódio	65
8. Apresentação e discussão dos resultados.....	69
8.1. Formação da pilha.....	69
8.2. Análise química	73
8.2.1. Análise química da farinha de alimentação ao forno.....	73
8.2.2. Análise química da farinha do ciclone 4.....	75
8.2.3. Análise química do clínquer	76
8.3. Módulos químicos.....	79
8.4. Indicadores de Benchmarking	82
8.5. Parâmetros do processo	83
8.6. Energia.....	88
8.7. Moagens de cimento	89
9. Síntese e conclusões.....	91
Anexo I	3
Anexo II	5
Anexo III.....	9
Anexo IV.....	11
Anexo V	25
Anexo VI.....	31
Anexo VII	37
Anexo VIII.....	39
Anexo IX.....	43

Índice de Figuras

Figura 1: Classificação de ligantes.....	5
Figura 2: Parte do forno (à esquerda) e da torre de ciclones de pré-aquecimento (à direita) da Cimpor (Coutinho, 2006).....	15
Figura 3: Esquema representativo de uma torre de ciclones de pré-aquecimento.	16
Figura 4: Clínquer à saída do arrefecedor (Coutinho, 2006).	20
Figura 5: Esquema simplificado da produção de cimento por via seca (Coutinho, 2006).	22
Figura 6: Esquema das transformações sofridas pelo cru até à sua transformação em clínquer (Coutinho, 2006).	25
Figura 7: Aspecto esquemático dos principais componentes do clínquer. Cristais poligonais de alite com pequenas inclusões de belite, cristais arredondados de belite com estriação característica, e fase intersticial de aluminato, ferrite e massa vítrea (Coutinho, 2006).	27
Figura 8: Contribuição dos compostos hidratados individualizados para o desenvolvimento da resistência do cimento (Coutinho, 2006).	29
Figura 9: Variação do grau de decarbonatação com a temperatura.....	32
Figura 10: Representação gráfica de uma curva típica relativa ao desenvolvimento de calor de hidratação de cimento, durante a hidratação e a temperatura constante (Coutinho, 2006).	35
Figura 11: Esquemática do ciclo de voláteis (CimporTec, 2003).....	49
Figura 12: Quadro resumo dos métodos utilizados.	55
Figura 13: Diagramas representativos da formação de uma pilha. (A) e (B) correspondem ao período de pré-paragem e (C) e (D) ao de pós-paragem. (A) corresponde à pilha utilizada nos dias 8.05.08 e 9.05.08 e (B) à pilha utilizada nos dias 9.05.08 a 11.05.08. Por sua vez, (C) corresponde à pilha utilizada nos dias 4.07.08 e 5.07.08 e (D) à pilha utilizada nos dias 5.07.08 e 6.07.08.	71
Figura 14: Aspecto do clínquer no período pré-paragem (A) e no período pós-paragem (B)..	78

Índice de Tabelas

Tabela 1: Reacções principais na fabricação de clínquer (Martins, 1996; Alexandre, 2004)..	30
Tabela 2: Limites de controlo relativos à análise química de uma pilha.....	71
Tabela 3: Limites de controlo relativos aos módulos químicos de uma pilha.	72
Tabela 4: Limites de controlo relativos à análise química do clínquer.	79
Tabela 5: Índices de Benchmarking correspondentes a ambos os períodos de monitorização.	83
Tabela 6: Produção de clínquer em ambos os períodos de monitorização.	88
Tabela 7: Incorporação de clínquer em ambos os tipos de cimento produzidos na Cimpor – Centro de Produção de Loulé.....	89

1. Introdução

A origem do cimento remonta a 4500 anos. Já os egípcios utilizavam um material feito de gesso calcinado como aglomerante. Entre os gregos e romanos, eram usados solos vulcânicos que endureciam depois de misturados com água.

Em 1756 o inglês John Smeaton criou uma mistura resistente através da calcinação de calcários argilosos e moles. Este é o marco da criação do cimento artificial. Tempos depois, em 1824, o construtor, também ele inglês, Joseph Aspdin produziu um pó muito fino a partir de pedras calcárias e argila que, depois de misturar água e secar, produzia um material muito rígido, análogo às pedras naturalmente empregues na construção. Este material foi baptizado por cimento Portland, em homenagem à ilha de Portland, onde existiam rochas semelhantes (<http://pt.wikipedia.org/wiki/Cimento>).

Desde então, a indústria cimenteira tem um papel importantíssimo no desenvolvimento mundial. Pela sua resistência, durabilidade, trabalhabilidade e infinitas possibilidades arquitectónicas, o cimento está presente em grandiosas obras pelo mundo fora, fazendo do betão o segundo produto mais consumido no mundo, sendo o primeiro a água.

O cimento, que se apresenta sob a forma de um pó fino com propriedades aglomerantes, é classificado como sendo um ligante hidráulico. No capítulo seguinte classificam-se e descrevem-se os tipos de ligantes.

1.1. Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se estruturado em 9 capítulos e reflecte o estudo desenvolvido na Cimpor – Centro de Produção de Loulé, na sequência da alteração do redutor do motor do forno.

No capítulo um, de cariz introdutório, pretende-se dar uma visão geral sobre a origem do cimento. No segundo capítulo definem-se e distinguem-se os vários tipos de ligantes, enquadrando, de uma forma mais concisa, o conceito de cimento. Segue-se o terceiro capítulo e com ele, uma explicação de todo o processo de fabrico do cimento, desde a preparação da matéria-prima até à sua expedição. O quarto capítulo, onde é abordada uma temática bastante importante, evidencia quais os principais constituintes do cru e do clínquer e as reacções que ocorrem ao longo do processo de fabrico. No quinto capítulo são introduzidos conceitos que permitem avaliar a qualidade do clínquer. O sexto capítulo explica o ciclo dos álcalis, cuja compreensão é bastante importante para perceber o que acontece em certas fases do processo. No sétimo capítulo apresenta-se a metodologia analítica adoptada neste trabalho, ou seja, os procedimentos laboratoriais necessários para preparar as amostras para análise. No oitavo capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos. É muito importante perceber que a análise deste estudo decorre em dois períodos temporais distintos, o período pré-paragem, que se refere ao período entre 8 e 11 de Maio, anterior à alteração ao processo e o período de pós-paragem, referente ao período entre 4 e 6 de Julho, posterior à alteração ao processo. Por fim, no nono e último capítulo são apresentadas as sínteses e conclusões.

Capítulo 2 - Ligantes

Índice

2.1. Definição	5
2.2. Ligantes hidrófilos	5
2.2.1. Ligantes hidrófilos aéreos	5
2.2.1.1. Gesso	6
2.2.1.2. Cal aérea	6
2.2.2. Ligantes hidrófilos hidráulicos	6
2.2.2.1. Cal hidráulica	7
2.2.2.2. Cimento	7
2.3. Ligantes hidrófobos	8

2. Ligantes

2.1. Definição

Um ligante é um produto que ganha presa e endurece, podendo aglomerar outros materiais, tais como agregado grosso e areia. São portanto substâncias com propriedades aglomerantes (Paulo, 2006).

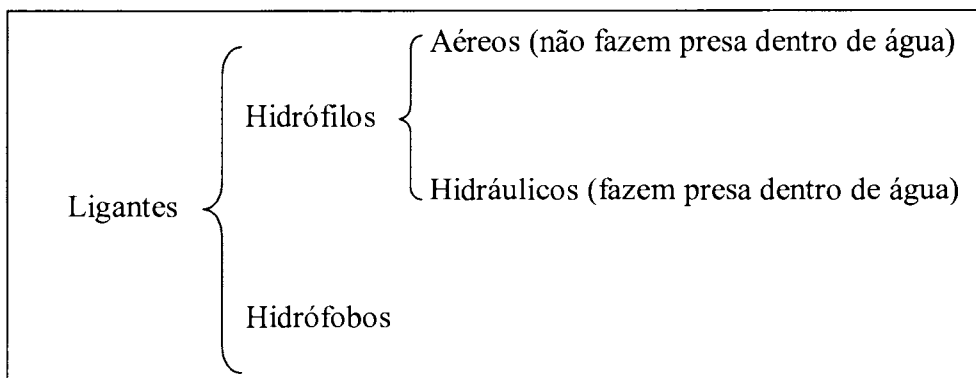


Figura 1: Classificação de ligantes.

2.2. Ligantes hidrófilos

Um ligante hidrófilo é um ligante que tem afinidade com a água, e quando misturado com a mesma forma uma pasta que endurece, podendo, como qualquer ligante, aglomerar outros materiais. É constituído por matéria sólida finamente pulverizada (Paulo, 2006). Os ligantes hidrófilos podem-se classificar de duas formas, em aéreos ou hidráulicos.

2.2.1. Ligantes hidrófilos aéreos

Um ligante hidrófilo aéreo é um ligante que misturado com a água forma uma pasta que endurece ao ar, pela acção química do CO_2 . A pasta endurecida, com ou sem outros materiais incorporados, não faz presa dentro de água (Paulo, 2006). Exemplos de ligantes hidrófilos aéreos são o gesso e a cal aérea.

2.2.1.1. Gesso

O gesso é um ligante simples que se encontra abundantemente na natureza, em terrenos sedimentares, apresentando-se sob a forma de anidrite (CaSO_4) ou pedra de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

A pedra de gesso ou gesso bruto é extraída das gesseiras e constituída essencialmente por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) podendo conter impurezas como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio. Quando submetida a tratamento térmico em fornos especiais origina compostos diversos, mais ou menos hidratados, e com propriedades diferentes, de acordo com a temperatura de cozedura (Paulo, 2006).

2.2.1.2. Cal aérea

A cal aérea é um ligante constituído sobretudo por óxidos de cálcio (CaO) ou hidróxidos de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que endurece lentamente ao ar por reacção com o dióxido de carbono (CO_2).

Provém da calcinação de rochas carbonatadas a temperaturas entre 800 e 1000°C. Estas rochas são ricas em carbonato de cálcio (CaCO_3 - calcite) e, eventualmente, em carbonato duplo de cálcio e magnésio ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ - dolomite) (Paulo, 2006).

2.2.2. Ligantes hidrófilos hidráulicos

Um ligante hidrófilo hidráulico misturado com a água forma uma pasta que endurece ao ar ou dentro de água e essa pasta endurecida, com ou sem outros materiais incorporados (Paulo, 2006). Exemplos de ligantes hidrófilos hidráulicos são a cal hidráulica e o cimento.

2.2.2.1. Cal hidráulica

Enquanto a cozedura do calcário puro entre 800 a 1000°C origina o óxido de cálcio, que constitui a cal aérea, a cozedura do calcário margoso (contém argila) origina as cals hidráulicas, (mais ou menos hidráulicas conforme o teor de argila) e também os cimentos naturais.

A cal retirada do forno deve ser extinta, não só com a finalidade de eliminar a cal viva (CaO), mas muito especialmente para provocar a pulverização de toda a cal hidráulica. Este fenómeno e a temperatura de cozedura distinguem a produção de cal hidráulica da produção do cimento (Paulo, 2006).

2.2.2.2. Cimento

Segundo a norma europeia (NP EN 197-1) a denominação cimento refere-se a um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água forma uma pasta que ganha presa e endurece por reacções e processos de hidratação e que, depois de endurecida, conserva a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água.

Um cimento que esteja de acordo com esta norma europeia é designado por cimento CEM e se for devidamente misturado com água e agregados, é possível obter-se betão ou argamassa (Paulo, 2006).

Os 27 produtos da família dos cimentos correntes, abrangidos pela NP EN 197-1, indicados na tabela I.1 dos anexos, agrupam-se em cinco principais tipos: CEM I: Cimento Portland; CEM II: Cimento Portland composto; CEM III: Cimento de alto-forno; CEM IV: Cimento pozolânico; e CEM V: Cimento composto.

Neste contexto considera-se que um constituinte principal do cimento corresponde a um material inorgânico especialmente seleccionado e utilizado numa percentagem superior a 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários. Por outro lado, um constituinte adicional minoritário corresponde a um material inorgânico especialmente seleccionado e utilizado numa percentagem não excedendo um total de 5% em massa em relação à soma de todos os constituintes principais e adicionais minoritários (Coutinho, 2006).

A Cimpor - Centro de Produção de Loulé tem como actividade principal o fabrico e expedição de dois tipos de cimento:

- ↳ Cimento Portland de calcário - CEM II/A-L 42,5R;
- ↳ Cimento Portland de calcário - CEM II/B-L 32,5N.

O CEM II ou cimento Portland é constituído por, pelo menos, 65% de clínquer no caso do CEM II/B-L e de 80% de clínquer no caso do CEM II/A-L.

2.3. Ligantes hidrófobos

Um ligante hidrófobo é um ligante em que a água não tem qualquer papel na produção e endurecimento do aglomerante e que “repele” a água após endurecimento. É constituído por substâncias mais ou menos viscosas que endurecem por arrefecimento, por evaporação dos seus solventes ou por reacção química entre diferentes componentes. Apresentam-se, não sob a forma de pó como os ligantes hidrófilos, mas sob a forma de líquidos viscosos ou soluções resinosas e, ao endurecer, formam estruturas coloidais rígidas.

Exemplos de ligantes deste tipo são o alcatrão, o asfalto (proveniente da destilação do petróleo) e matérias plásticas ou sintéticas como resinas (Paulo, 2006).

Capítulo 3 - Processo de Fabrico

Índice

3.1. Introdução	11
3.2. Preparação do cru	11
3.3. Cozedura e arrefecimento	12
3.3.1. Equipamentos	14
3.3.1.1. Pré-aquecimento	14
3.3.1.1.1. Grelha de pré-aquecimento	14
3.3.1.1.2. Torre de pré-aquecimento	15
3.3.1.1.3. Pré-calcinador	17
3.3.1.2. Forno (tubo rotativo)	18
3.3.1.3. Arrefecedor	19
3.4. Adição de gesso e moagem	20
3.5. Ensilagem e expedição	21

3. Processo de fabrico do cimento

3.1. Introdução

Atendendo ao facto de 70 a 80% da matéria-prima utilizada para fazer cimento ser calcário, em geral uma fábrica de cimento situa-se junto a um depósito calcário.

Os processos envolvidos na produção de cimento são complexos e compreendem diferentes fases de fabrico:

- ↳ Preparação do cru:
 - Extração do calcário;
 - Britagem;
 - Pré-homogeneização;
 - Moagem e homogeneização;
 - Correção com aditivos;
- ↳ Cozedura e arrefecimento;
- ↳ Adição de gesso e moagem;
- ↳ Ensilagem e expedição (ECC, 1994).

3.2. Preparação do cru

A pedraira é explorada em grandes massas, blocos de grandes dimensões (podem atingir os 2m de comprimento) são extraídos e transportados para um britador que os reduz a blocos de apenas alguns centímetros.

O material britado é transportado para uma pilha de armazenamento, a pré-homogeneização. A mistura é depositada em camadas horizontais e a sua remoção é feita por meio de cortes verticais.

As reacções químicas promovidas pela acção da temperatura entre os componentes da matéria-prima são essencialmente reacções no estado sólido. Para activar as reacções entre fases sólidas, devido à lenta difusão dos átomos e moléculas nos sólidos, é necessário elevar a temperatura e a área da superfície dos reagentes. A velocidade da reacção entre fases sólidas é portanto função do grau de finura, natureza química dos materiais e duração do aquecimento.

As reacções em fase líquida são muito mais rápidas e os produtos da reacção só dependem da temperatura e composição química das fases líquidas. Daqui resulta a importância da preparação das matérias-primas para o cimento, nomeadamente, a finura da moagem, homogeneidade e proporção da fase líquida (cerca de 20%) à temperatura de cozedura.

A matéria-prima depois de moída é levada a silos, ou tanques de homogeneização, onde é sujeita a análise química, actualmente automática e instantânea, por meio de Raios γ , com ligação a um computador que calcula as correcções a fazer e comanda os silos de aditivos, correctores, em areia (para aumentar o teor em sílica), cinzas de pirite (para aumentar o teor em ferro), bauxite (para aumentar o teor em alumina) ou argila (para aumentar o teor em sílica e alumina). Após esta correcção, o cru entra para os silos alimentadores do forno (Coutinho, 2006).

3.3. Cozedura e arrefecimento

A etapa de cozedura e arrefecimento é a mais importante numa instalação de fabrico de clínquer. A farinha crua, obtida na sequência dos processos de moagem e homogeneização das matérias-primas, é transformada em clínquer por tratamento térmico. A transformação efectua-se em fornos rotativos de grandes dimensões, no seio dos quais se opera o tratamento do cru a temperaturas na ordem dos 1400 a 1500°C (Lopes; Leitão, sem data).

Atendendo à maior ou menor quantidade de água que a farinha possui à entrada do forno pode classificar-se o processo de cozedura como:

↳ Via húmida: neste processo a matéria-prima é moída com água, formando uma pasta (com cerca de 35% de água), a qual depois de ter sido homogeneizada por agitação mecânica e por insuflação de ar, é bombeada para a entrada do forno. Actualmente, este processo de fabrico é pouco utilizado devido ao elevado custo energético.

↳ Via semi-húmida: o material é preparado em via húmida, sendo depois seco antes de entrar no forno. Após mistura por diluição, o excesso de água é extraído por acção mecânica

↳ em filtros-prensa ou em filtração sob vácuo. Os bolos de filtração são tratados termicamente sobre uma grelha ou transformados, após secagem, em farinha para alimentar um pré-aquecedor de ciclones. Este processo é ainda utilizado nos casos em que as argilas da pedreira possuem um elevado teor em humidade (aproximadamente 20%).

↳ Via semi-seca: a farinha crua seca é humidificada por injeção de água (aproximadamente 12%). Aglomera-se sob a forma de nódulos que são posteriormente secos sobre a grelha de um pré-aquecedor, pelos gases quentes que saem do forno, descarbonatando-se parcialmente e entrando seguidamente no forno.

↳ Via seca: a farinha crua é introduzida num forno rotativo, precedido por um permutador externo estático, frequentemente de ciclones, possuindo um baixo teor em humidade (no máximo 1%). É o processo utilizado pela Cimpor, sendo que o Centro de Produção de Loulé foi a primeira fábrica de cimento nacional a adoptar este processo. É igualmente o mais utilizado actualmente e mais económico do ponto de vista energético (Lopes; Leitão, sem data).

3.3.1. Equipamentos

Os dois processos mais importantes de cozedura são a via seca e a via semi-seca, pelo que seguir-se-á uma abordagem mais detalhada aos equipamentos que lhes estão associados.

3.3.1.1. Pré-aquecimento

Com o intuito de melhorar o rendimento térmico e de utilizar melhor o calor libertado pelos combustíveis no forno, os gases que saem a cerca de 1000°C do arrefecedor são utilizados numa instalação de pré-aquecimento do cru colocada à entrada do forno (Lopes; Leitão, sem data).

Um pré-aquecedor de farinha é um permutador de calor no qual as transferências térmicas se efectuam por contacto entre a matéria e os gases. Esta operação inicia-se pela evaporação da água superficial (a que ainda restar) e pela dissociação da água de cristalização que o cru poderá ainda conter (sobretudo devido à presença de argilas). O pré-aquecimento prossegue até à descarbonatação parcial da farinha (Lopes; Leitão, sem data).

Os equipamentos que constituem um sistema de pré-aquecimento são os seguintes:

- ↳ Grelha de pré-aquecimento (somente para a via semi-seca);
- ↳ Torre de pré-aquecimento (somente para via seca);
- ↳ Pré-calcinador.

Descreve-se seguidamente cada um destes equipamentos.

3.3.1.1.1. Grelha de pré-aquecimento

Neste sistema, a farinha é granulada antes de ser distribuída numa camada uniforme sobre uma grelha móvel que a faz avançar. A grelha é dividida em duas câmaras, correspondentes às diferentes trocas térmicas, a primeira para a secagem e a segunda para a descarbonatação

parcial. A permuta térmica efectua-se entre os grânulos de farinha e os gases quentes, provenientes do forno (a uma temperatura de aproximadamente 1000°C) ao atravessarem o material (Lopes; Leitão, sem data).

3.3.1.1.2. Torre de pré-aquecimento

Empregam-se hoje em fábricas de maior produção, pré-aquecedores de ciclones, que constituem talvez o maior desenvolvimento, em termos de redução de consumo energético na produção do cimento.

Na figura 2 pode ver-se a fotografia de parte do forno e parte da torre de ciclones de pré-aquecimento.



Figura 2: Parte do forno (à esquerda) e da torre de ciclones de pré-aquecimento (à direita) da Cimpor (Coutinho, 2006).

Neste sistema a transferência de calor entre os gases e a matéria dá-se num conjunto de ciclones separados e de condutas. A permuta ocorre em co-corrente no interior de cada ciclone e, em contra-corrente no conjunto do permutador (Figura 3). O rendimento do sistema depende, entre outros factores, da dispersão da matéria na corrente gasosa. Existe todo um conjunto de modelos de pré-aquecedores de ciclones, inspirados no aquecedor de Humboldt (Lopes; Leitão, sem data).

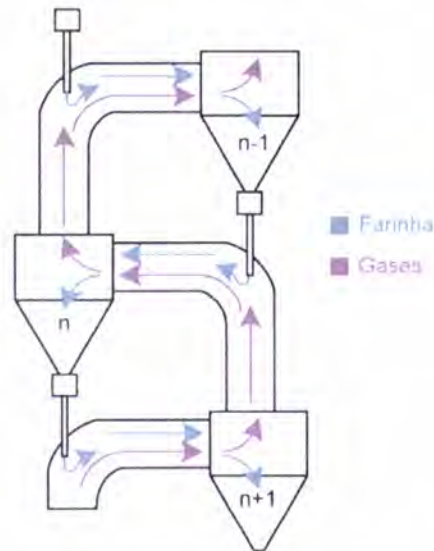


Figura 3: Esquema representativo de uma torre de ciclones de pré-aquecimento.

Um pré-aquecedor de ciclones é constituído por uma série de ciclones em cascata no interior de uma torre, sobre múltiplos andares. Torre esta que pode possuir até 6 andares de ciclones e atingir uma altura de 125m (Lopes; Leitão, sem data). No caso particular do Centro de Produção de Loulé o pré-aquecedor de ciclones é constituído por uma torre de 4 andares, onde no primeiro andar estão 2 ciclones que funcionam como um só, o ciclone 1 e o ciclone 1 bis, no segundo andar está o ciclone 2, no terceiro andar está o ciclone 3 e no quarto andar o ciclone 4.

Um ventilador de tiragem de grande capacidade, o ventilador exaustor, assegura a circulação ascendente dos gases quentes provenientes do forno no conjunto dos ciclones. O caudal do exaustor é regulado em função da combustão no forno (Lopes; Leitão, sem data).

A farinha crua é introduzida na parte superior da torre, na conduta de entrada dos ciclones do andar superior. Estes ciclones apresentam uma eficiência de separação superior aos restantes andares, a fim de diminuir a saída de material pela conduta de saída da torre. A farinha é alimentada à torre através de uma bomba pneumática ou através de um elevador, alimentados a partir de um doseador ponderal comandado a partir da sala de comando (Lopes; Leitão, sem data).

A matéria desce por gravidade de um ciclone, para a conduta do ciclone do andar inferior, através de uma conduta de pequeno diâmetro. A corrente gasosa ascendente proveniente do ciclone inferior encontra-se com esta matéria e dirige-se para o ciclone do andar superior através de uma conduta de grandes dimensões. É nestas condutas que ocorre uma importante parte da troca térmica (Lopes; Leitão, sem data).

Os gases que saem do forno a uma temperatura na ordem dos 1000°C, após atravessarem o pré-aquecedor, possuem uma temperatura na ordem dos 280 a 400°C, dependendo, entre outros factores, do número de andares da torre. Estes gases são enviados para os moinhos de cru com o intuito de serem reutilizados (Lopes; Leitão, sem data).

A farinha entra na torre a uma temperatura de 60 a 80°C, chegando à saída entre 30 a 60s e com uma temperatura na ordem dos 850°C. Encontra-se parcialmente descarbonatada, variando o seu grau de descarbonatação entre 20 e 50%. O emprego de pré-calcinadores permite aumentar o grau de descarbonatação até 95% (Lopes; Leitão, sem data).

3.3.1.1.3. Pré-calcinador

A utilização de equipamentos de pré-calcinação, inseridos entre o pré-aquecedor e o forno, datam apenas dos anos 70, tendo sido a sua expansão muito rápida (apesar de ser um equipamento opcional) devido ao seu elevado desempenho (Lopes; Leitão, sem data).

A reacção de descarbonatação é muito endotérmica, consome cerca de 400kcal/kg de clínquer entre 800 e 900°C. Para uma idêntica capacidade de produção, a pré-calcinação apresenta o interesse de levar a uma diminuição das dimensões do forno, uma vez que aí apenas terá de realizar-se a conclusão da descarbonatação e a clínquerização. Para idênticas dimensões do forno, a pré-calcinação permite um aumento importante da capacidade de produção. O pré-

calcinador está equipado com um queimador específico, sendo o ar para a combustão proveniente da entrada do arrefecedor (Lopes; Leitão, sem data).

Além de todas estas vantagens, a pré-calcinação permite ainda, de um modo geral, que a própria marcha do forno se torne mais regular.

3.3.1.2. Forno (tubo rotativo)

O forno é o elemento principal de uma instalação de fabrico de clínquer. Antigamente, e ainda actualmente (no estrangeiro) nas fábricas de pequena produção (até 500t/dia) o forno é vertical (“shaft kilns”) mas após a descoberta do forno rotativo, este tem sido utilizado cada vez com mais frequência, uma vez que permite uma produção de 8000t/dia e um produto final mais homogéneo (Coutinho, 2006).

O forno rotativo, constituído por um cilindro de chapa de aço com diâmetro e comprimento que podem atingir até 7,6m e 232m, respectivamente, é revestido inteiramente com material refractário. O cilindro assenta sobre roletes que o fazem girar e tem uma inclinação de 2 a 6°. O movimento de rotação (1 a 3,5 rotações/min.) e a inclinação provocam o avanço dos materiais no interior do forno. No extremo inferior introduz-se o combustível e o respectivo ar comburente, proveniente do arrefecedor de clínquer (Coutinho, 2006). Funciona como um permutador de calor em contra-corrente, no qual a chama é dirigida da saída para a entrada do tubo, que eleva a uma temperatura extremamente alta a farinha que avança em sentido oposto. A farinha, proveniente do pré-aquecedor e introduzida na entrada do forno, leva cerca de 30 a 90min até cair no arrefecedor sob a forma de clínquer (Lopes; Leitão, sem data).

Existem quatro formas de realizar a alimentação ao forno:

1. Entrada directa da farinha (via seca);
2. Entrada directa da pasta de cru (via húmida);
3. Entrada directa da farinha humedecida com água, aglomerada em grânulos (via semi-seca);
4. Entrada directa da pasta de cru dissecada por meio de uma compressão e filtração (via semi-húmida) (Coutinho, 2006).

O forno divide-se em três zonas distintas: uma primeira denominada zona de transição (situa-se na parte inicial do forno, onde a calcinação e a formação de fase líquida se sobrepõem), uma segunda denominada zona de clinquerização (onde ocorre a fase final de formação dos compostos de clínquer) e uma terceira denominada zona de arrefecimento (situa-se no final do forno e é bastante relevante uma vez que a formação de fases ainda não cessou).

3.3.1.3. Arrefecedor

O arrefecedor é um equipamento que permite o arrefecimento rápido do clínquer, de modo a permitir o respectivo transporte e armazenamento. Um arrefecimento rápido permite maximizar a qualidade do clínquer, uma vez que permite manter o silicato tricálcico num estado meta-estável (Lopes; Leitão, sem data).

A recuperação de calor reduz sensivelmente o consumo específico de calor necessário à produção de clínquer, pela carga térmica do ar de combustão do forno (ar secundário) e pré-calcinador (ar terciário), bem como do ar eventualmente utilizado nas operações de moagem-secação do cru. O rendimento da operação é definido pela relação entre a quantidade de calor recuperado e a quantidade inicialmente presente no clínquer (Lopes; Leitão, sem data).

3.4. Adição de gesso e moagem

Após a saída do arrefecedor o clínquer é armazenado, terminando o seu arrefecimento com aspecto negro e duro (Figura 4). Entra depois nos moinhos de bolas, onde é moído, juntamente com adjuvantes (para facilitar a moagem), com aditivos, mais concretamente o gesso (para regular o tempo de presa) e outros, como a pozolana e a escória de alto-forno (para modificar algumas propriedades) (Coutinho, 2006).



Figura 4: Clínquer à saída do arrefecedor (Coutinho, 2006).

A moagem é efectuada em moinho de bolas idêntico aos da preparação do cru, numa operação que consome cerca de 40% da energia total do fabrico do cimento.

Os elementos finos produzidos por moagem tendem a diminuir muito rapidamente o rendimento desta operação. O aparecimento de elementos finos, embora desejado, aumenta a compacticidade da mistura do clínquer com as bolas, diminuindo a eficácia das mesmas. É por isso necessário eliminá-los o mais rapidamente possível, à medida que se vão formando. Para a solução deste caso há dois tipos de moagem: em circuito aberto e em circuito fechado (ECC, 1994), apesar de na Cimpor em Portugal já só se utilizar a moagem em circuito fechado, uma vez que permite maior eficiência energética.

Na moagem em circuito aberto o clínquer, juntamente com o gesso, é introduzido no moinho que tem três compartimentos com bolas de aço de diâmetro sucessivamente menor, desde 60 a 80mm no primeiro compartimento (1/6 do comprimento do moinho) passando por um compartimento intermédio com bolas de 30 a 50mm até diâmetros de 15 a 25mm no último (com metade do comprimento) (ECC, 1994).

Na moagem em circuito fechado, os finos vão sendo extraídos do moinho à medida que se vão produzindo. Uma corrente de ar atravessa o moinho, da entrada para a saída, arrastando as partículas mais finas, para um separador dinâmico, onde são classificadas: as finas vão para os silos de armazenamento, e as mais grossas voltam ao moinho (ECC, 1994).

O clínquer depois de arrefecido e moído com uma pequena percentagem de gesso toma a designação de cimento.

3.5. Ensilagem e expedição

Dos moinhos de bolas, o cimento passa para grandes silos de armazenamento e daí é distribuído, a granel ou em sacos.

A expedição de cimento pode ser feita por camião, comboio ou navio, de acordo com as respectivas disponibilidades.

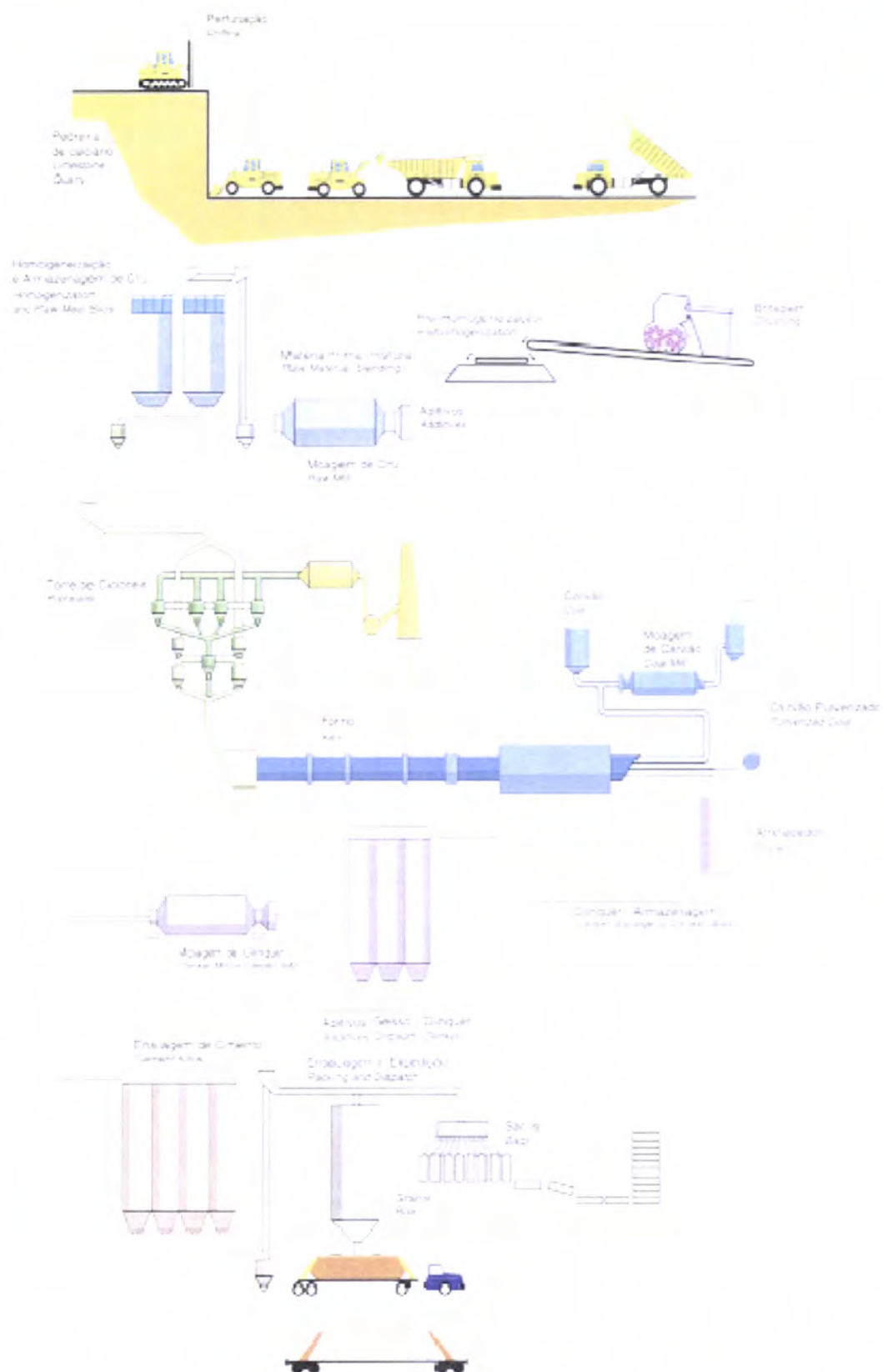


Figura 5: Esquema simplificado da produção de cimento por via seca (Coutinho, 2006).

Capítulo 4 – Componentes Principais do cru e do Clínquer

Índice

4.1. Introdução	25
4.2. Componentes da matéria-prima	25
4.3. Componentes principais do clínquer	27
3.3.1. C_3S	27
4.3.2. C_2S	28
4.3.3. C_3A	28
4.3.4. C_4AF	28
4.4. Cálculo dos componentes principais do clínquer	29
4.5. Reacções no processo de fabrico do cimento	30
4.5.1. Secagem	31
4.5.2. Decomposição das argilas	31
4.5.3. Decomposição dos carbonatos	31
4.5.4. Reacções em fase sólida	32
4.5.5. Reacções na presença de fase líquida	33
4.5.6. Reacções durante o arrefecimento	34
4.5.7. Presa, endurecimento e hidratação	35

4. Componentes principais do cru e do clínquer

4.1. Introdução

Os componentes da matéria-prima sujeitos à ação da temperatura vão sofrendo uma série de reações químicas e vão-se transformando em diversos compostos como esquematizado no diagrama da figura 6 (Coutinho, 2006).

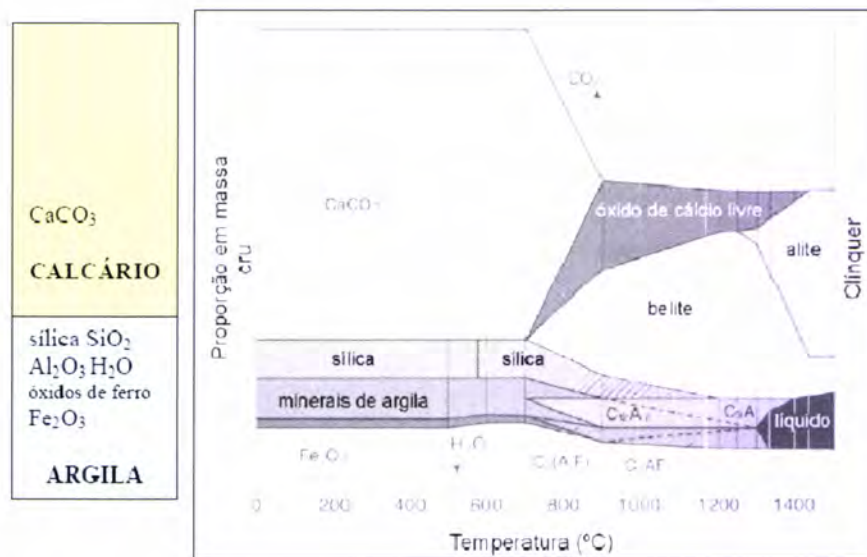


Figura 6: Esquema das transformações sofridas pelo cru até à sua transformação em clínquer (Coutinho, 2006).

4.2. Componentes da matéria-prima

A composição da matéria-prima é obtida pela mistura devidamente doseada de calcário e argila que compreende: calcite: CaCO_3 ; sílica: SiO_2 ; minerais de argila: $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$; e óxidos de ferro: Fe_2O_3 (Coutinho 2006).

É difícil encontrar na natureza uma única rocha com a composição ideal. É portanto necessário misturar diversos tipos de rochas, umas mais ricas em carbonato de cálcio, CaCO_3 (que posteriormente dá origem ao CaO) e outras mais ricas em SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

A composição da matéria-prima deve ser tal que depois de perder a água e o dióxido de carbono devido à elevada temperatura atingida no forno, tenha uma composição química dentro dos seguintes limites:

- ↪ CaO - 60 a 67%;
- ↪ SiO₂ - 17 a 25%;
- ↪ Al₂O₃ - 3 a 8%;
- ↪ Fe₂O₃ - 0.5 a 6% (Coutinho 2006).

Além destes componentes principais, a matéria-prima contém ainda metais alcalinos, magnésio, titânio, fósforo e, eventualmente, sulfatos:

- ↪ MgO - 0.5 a 4%;
- ↪ K₂O e Na₂O - 0.3 a 1.2%;
- ↪ SO₃ - 2 a 3.5% (Coutinho 2006).

É costume na Química do cimento, considerar-se a seguinte notação abreviada:

- ↪ CaO – C;
- ↪ SiO₂ – S;
- ↪ Al₂O₃ – A;
- ↪ Fe₂O₃ – F;
- ↪ H₂O – H;
- ↪ SO₃ – \bar{S} ;
- ↪ MgO – M.

4.3. Componentes principais do clínquer

As reacções químicas que ocorrem pela acção da temperatura, a partir da matéria-prima, levam à formação dos componentes principais do clínquer, os quais cristalizam em elementos mais ou menos individualizados, enumerados seguidamente:

- ↪ Silicato tricálcico: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (de 20 a 65%) → C_3S (alite);
- ↪ Silicato bicálcico: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (de 10 a 55%) → C_2S (belite);
- ↪ Aluminato tricálcico: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (de 0 a 15%) → C_3A (aparece c/ mat. vítrea);
- ↪ Alumino ferrato tetracálcico: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (de 5 a 15%) → C_4AF (ferrite).

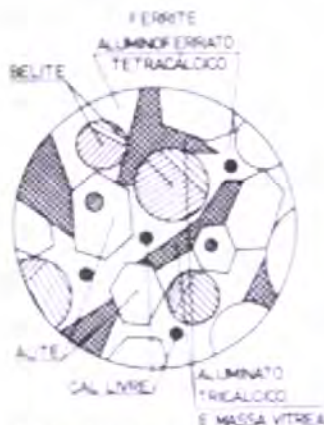


Figura 7: Aspecto esquemático dos principais componentes do clínquer. Cristais poligonais de alite com pequenas inclusões de belite, cristais arredondados de belite com estriação característica, e fase intersticial de aluminato, ferrite e massa vítrea (Coutinho, 2006).

4.3.1. C_3S

Os cristais de alite são poligonais, de estrutura romboédrica, rectangulares ou hexagonais, com dimensões entre 10 e $50\mu\text{m}$ (Figura 7). É a principal fase mineralógica do clínquer e é responsável pela resistência mecânica às idades jovens (Figura 8) (CimporTec, 2001).

4.3.2. C₂S

A belite é constituída essencialmente por silicato bicálcico β . Os cristais apresentam estriações, a sua dimensão é da ordem de 30 μm . Os grãos não têm forma cristalina definida, são arredondados, amarelados, mais ou menos escuros (Figura 7). É responsável pela resistência mecânica às idades avançadas (Figura 8) (CimporTec, 2001).

4.3.3. C₃A

O aluminato tricálcico é um material sem cor, como o vidro, e aparece como material de enchimento entre os grãos de alite e de belite, em simultâneo com uma massa vítrea (Figura 7). É uma fase importante do clínquer para a obtenção da fase líquida. Reage com os sulfatos e influencia a resistência nas primeiras horas (Figura 8). É o primeiro a hidratar-se e é devido à sua elevada velocidade de hidratação que se adiciona gesso ao cimento para retardar a presa (CimporTec, 2001).

4.3.4. C₄AF

A ferrite, que ocorre entre os cristais de alite e belite (Figura 7), reconhece-se pela sua cor amarelo-alaranjada, é constituída por soluções sólidas entre um ferrato bicálcico e um aluminato bicálcico e na qual o aluminoferrato tetracálcico (C₄AF) é um ponto de especial importância. A esta solução sólida chama-se fase ferrítica. Pode dizer-se que, praticamente, não influencia as resistências do cimento (Figura 8), contudo é a responsável pela cor cinzenta do cimento, pelo que o cimento branco não contém ferrite (CimporTec, 2001).

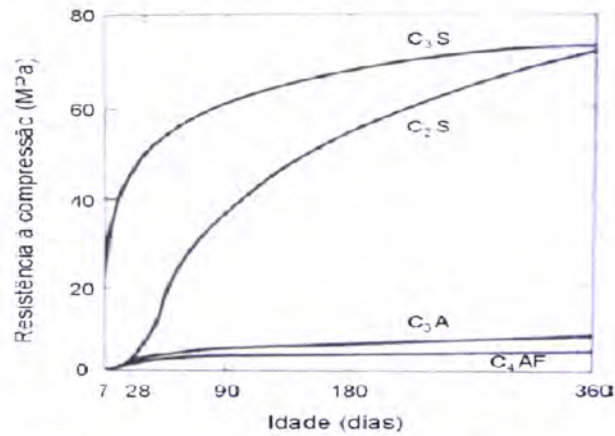


Figura 8: Contribuição dos compostos hidratados individualizados para o desenvolvimento da resistência do cimento (Coutinho, 2006).

4.4. Cálculo dos componentes principais do clínquer

Actualmente existem vários métodos para determinar a composição de fases do clínquer, tais como métodos de difracção de raios X, microscopia óptica, microscopia electrónica de varrimento, dissolução selectiva, análise termo-gravimétrica e o método de Bogue (que é um método de cálculo enquanto todos os outros são métodos de análise). Entre os tradicionais métodos, este último tem sido o mais usado.

Com o objectivo de simplificar o cálculo dos componentes principais do clínquer considera-se que o clínquer arrefecido corresponde à composição de um estado de equilíbrio total entre os componentes cristalizados como se as temperaturas se mantivessem constantes. Desta forma pode determinar-se a “composição de Bogue” a partir da quantidade de óxidos determinada por análise no raio X (Coutinho, 2006). O método de Bogue permite assim calcular esses mesmos componentes a partir das seguintes expressões:

$$C_3S = 4,07(CaO) - 7,60(SiO_2) - 6,72(Al_2O_3) - 1,43(Fe_2O_3) \quad 1$$

$$C_2S = 8,60(SiO_2) + 1,08(Fe_2O_3) + 5,07(Al_2O_3) - 3,07(CaO) \quad 2$$

$$C_3A = 2,65(Al_2O_3) - 1,69(Fe_2O_3) \quad 3$$

$$C_4AF = 3,04(Fe_2O_3) \quad 4$$

Este método tem algumas limitações como o facto de considerar que todo o clínquer está cristalizado, não ficando nenhum material vítreo após arrefecimento e também considerar que os compostos formados são puros, sem inclusão de elementos menores. Contudo este é um método bastante rápido e simples e quando a produção de elementos menores é aproximadamente constante é também bastante eficaz.

4.5. Reacções no processo de fabrico do clínquer

As reacções principais do processo de produção de clínquer dão-se a determinadas temperaturas e em condições específicas, havendo necessidade de fornecimento de energia para que as reacções endotérmicas possam ocorrer. Há no entanto reacções que libertam energia (exotérmicas), mas estas só ocorrem a temperaturas elevadas. A tabela 1 evidencia sucintamente as referidas reacções (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

Tabela 1: Reacções principais na fabricação de clínquer (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

Temperatura (°C)	Processo
Até 100	Evaporação da água livre (seca a mistura de calcário e argila)
Até 450	Evaporação da água adsorvida nos componentes da matéria-prima
500 – 600	Desidroxilação dos materiais argilosos
700 – 900	Decomposição dos carbonatos e formação dos óxidos
900 – 1200	Reacção do CaO com os alumino-silicatos
1200 – 1280	Início da formação da fase líquida
1280	Formação de C_2S
1280 – 1330	Continuação da formação de fase líquida e formação de C_3S
1330 – 1450	Crescimento dos cristais de C_3S e C_2S
1300 - 150	Arrefecimento: cristalização da fase líquida

Em seguida explicam-se as reacções mais importantes no processo de fabricação de clínquer.

4.5.1. Secagem

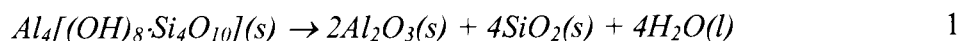
Na secagem das matérias-primas dá-se a evaporação da humidade. Existem diversos tipos de humidade nas matérias-primas:

- ↳ Água livre presente na superfície dos grãos do material;
- ↳ Água capilar, que enche as zonas ocas da sua estrutura;
- ↳ Água adsorvida na superfície do material.

A libertação da humidade dá-se em grande parte durante a moagem e na zona mais alta da torre de pré-aquecimento (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

4.5.2. Decomposição das argilas

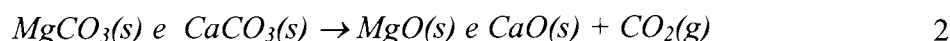
A primeira transformação que ocorre é a decomposição das argilas e micas entre os 500 e 600°C. Por exemplo,



As espécies transformam-se em minerais mais simples, pouco cristalinos, com maior superfície específica e conseqüentemente com maior reactividade (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

4.5.3. Decomposição dos carbonatos

A decomposição dos carbonatos inicia-se a cerca de 700°C nos ciclones superiores. Por exemplo,



O dióxido de carbono (CO_2) é arrastado pelos gases do forno, sendo posteriormente libertado para a atmosfera. Este é um dos problemas apontados à indústria cimenteira porque liberta este gás não tóxico mas prejudicial para a atmosfera pelo efeito de estufa.

O grau de descarbonatação varia directamente com a temperatura, como evidencia o gráfico da figura 9.

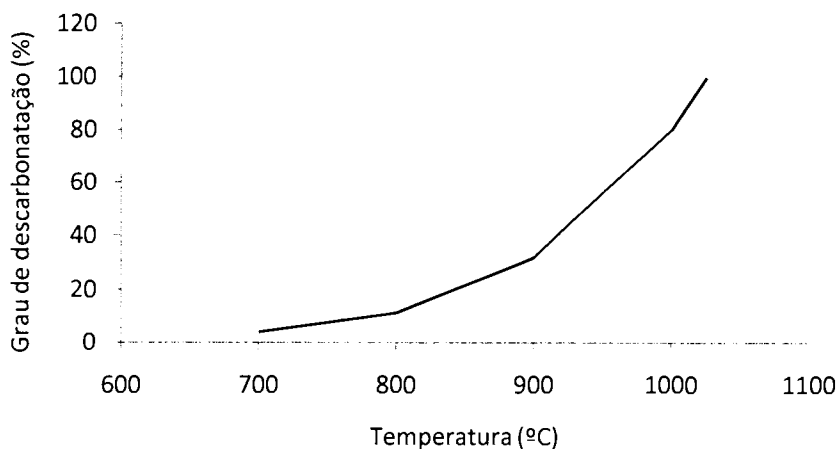


Figura 9: Variação do grau de descarbonatação com a temperatura.

A seguir à torre de pré-aquecimento existe a zona de transição do forno onde a calcinação e a formação da fase líquida se sobrepõem. Algumas partículas mais finas ou expostas mais favoravelmente aos gases quentes do forno na camada superficial do material, podem já ter atingido a calcinação completa e começam a reagir com o silício, alumínio e ferro da fase líquida. Por sua vez, para outras partículas a calcinação não terá ainda terminado, não havendo ainda formação da fase líquida (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

4.5.4. Reacções em fase sólida

A formação de C_2S é uma reacção no estado sólido e a sua eficácia depende da difusão dos iões através da estrutura cristalina.



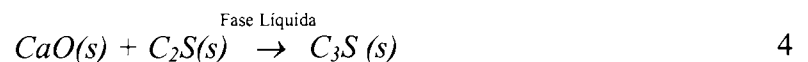
É quando desta transformação que se revela a eficiência da moagem e da homogeneidade das matérias-primas, uma vez que quanto mais facilitadas forem as colisões entre as partículas maior será a velocidade desta reacção.

Na zona de clínquerização, onde ocorre a fase final de formação dos compostos de clínquer, as fases instáveis como o C_5A_3 e o C_4A_7 transformam-se em fases estáveis como o C_3A e o C_4AF (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

4.5.5. Reacções na presença de fase líquida

Apenas cerca de 20% da matéria-prima funde, os restantes 80% reagem no estado sólido. A fase líquida do clínquer forma-se por fusão dos aluminatos e ferritos e é bastante importante para a formação do C_3S e igualmente importante para a formação da crosta¹.

A formação de C_3S pressupõe a existência de C_2S , CaO e fase líquida, como se pode verificar pela equação 4,



A velocidade desta reacção depende de diversos factores, nomeadamente:

- ↪ Distância de difusão de CaO através da fase líquida (onde está evidente a granulometria e homogeneidade da matéria-prima);
- ↪ Fase líquida (dependente da composição das matérias-primas, mais especificamente do seu módulo silicioso²);
- ↪ Viscosidade da fase líquida.

(Martins, 1996; Alexandre, 2004)

¹ A crosta é uma camada protectora que se forma sobre o revestimento de refractário na zona de sinterização, onde o papel da fase líquida do clínquer é ser o “agente colante”.

² O modo silicioso (MS) é uma relação percentual entre alguns componentes das principais fases do clínquer, $MS = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ (Coutinho, 2006).

4.5.6. Reacções durante o arrefecimento

Durante o arrefecimento ocorre a consolidação da alite na fase cristalina e a cristalização da fase líquida para formar os aluminatos, o ferrito e o sulfato.

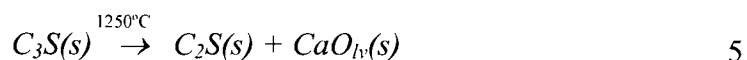
Se o arrefecimento for rápido o que acontece é o seguinte:

- ↳ A formação de pequenos cristais de C_3A e C_4AF homogeneamente misturados;
- ↳ A SiO_2 mantém-se em solução sólida;
- ↳ O MgO faz parte da solução sólida ou forma-se em cristais muito pequenos, logo dificulta a sua hidratação evitando a expansibilidade do cimento;
- ↳ Impede a decomposição da alite em belite

(Martins, 1996; Alexandre, 2004).

Porém se o arrefecimento for lento:

- ↳ Formam-se grandes cristais de C_3A e C_4AF e muito separados (não homogéneos), dificultando a moagem do clínquer;
- ↳ Forma-se C_2S e cal livre (CaO_{lv}) secundários a partir da decomposição do C_3S , como se pode ver na seguinte reacção,



(Martins, 1996; Alexandre, 2004).

O arrefecimento não deve ser lento, pois a decomposição de alite, que costuma ser lenta, é bastante rápida quando se trata de alite no clínquer industrial, devido à presença de Fe^{2+} , K_2SO_4 e $CaSO_4$ (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

Em suma, o arrefecimento, que é uma etapa bastante importante do processo de fabrico de clínquer, deve ser rápido para garantir uma melhor qualidade.

4.5.7. Presa, endurecimento e hidratação

Durante um período inicial designado por período dormente ou de indução, após a amassadura de água e cimento, a fluidez ou consistência da pasta mantém-se relativamente constante e embora se verifique uma perda gradual de fluidez, é possível recuperá-la ao reamassar a pasta.

Em geral 2 a 4 horas depois da amassadura, a temperaturas normais, a mistura começa a ganhar rigidez muito mais rapidamente e considera-se que se atingiu o início de presa. No entanto a resistência é ainda muito baixa e o endurecimento só começa após o fim de presa, que ocorre uma hora depois. O endurecimento é depois muito rápido nos primeiros dois dias e, posteriormente, a resistência continua a aumentar mas a uma taxa cada vez menor, durante semanas, meses e anos. A pasta de cimento desenvolve calor, em particular durante a presa e início de endurecimento. As reacções de hidratação são exotérmicas e ao medir o calor de hidratação ao longo destas fases, a temperatura constante, obtêm-se curvas do tipo da figura 10 (Coutinho 2006).

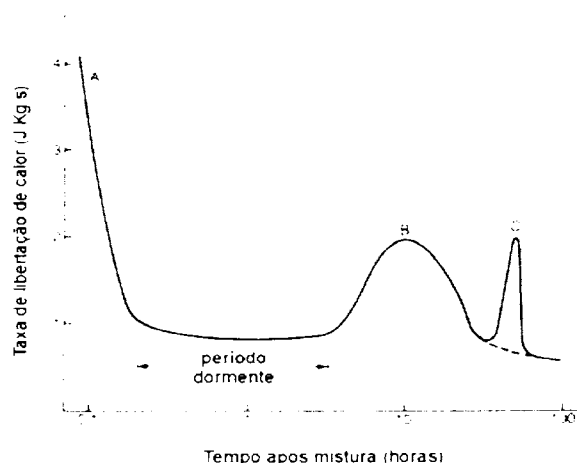


Figura 10: Representação gráfica de uma curva típica relativa ao desenvolvimento de calor de hidratação de cimento, durante a hidratação e a temperatura constante (Coutinho, 2006).

O máximo (A) resulta da hidratação inicial à superfície das partículas de cimento, sobretudo do C_3A . Este dura apenas alguns minutos, e a curva de desenvolvimento de calor decresce



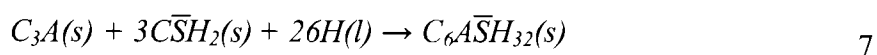
rapidamente, mantendo-se com um valor reduzido em que praticamente não se verificam reacções. O pico (B) corresponde à reactividade máxima de hidratação, e procede o fim de presa. Posteriormente a curva decresce gradualmente e, por vezes, poderá verificar-se um novo máximo (C), um ou dois dias depois.

Todo este comportamento é devido à hidratação dos quatro componentes principais do cimento e pela interacção entre os produtos de hidratação (Coutinho, 2006).

O C_3A no estado puro reage com a água muito rapidamente (ao fim de alguns minutos), conduzindo a uma presa rápida ou praticamente instantânea, acompanhada por desenvolvimento de calor,



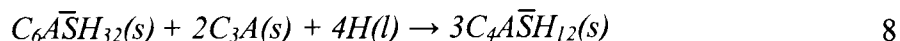
Para moderar ou retardar esta reacção é necessário juntar ao cimento um sulfato, o mais económico dos quais é o gesso natural. Este reage lentamente com o C_3A formando-se etringite (sulfoaluminato de cálcio hidratado - $C_6\bar{A}\bar{S}H_{32}$) isto é, o gesso protege o C_3A da água (Coutinho, 2006),



O período dormente (Figura 10) é causado pela formação de etringite (a partir de gesso) e pela sua precipitação sobre a superfície do C_3A , cuja solubilidade é baixa em presença de sulfatos. O fim do período dormente parece ser devido ao desaparecimento da camada de protecção que envolve o C_3A , começando então a formação de produtos de hidratação, CSH, a partir de componentes do cimento (Coutinho, 2006).

Cerca de 24 horas depois, o gesso já foi totalmente consumido e começa a transformação da etringite em monosulfoaluminato ($C_4\bar{A}\bar{S}H_{12}$). São estas reacções que correspondem ao máximo (C) que por vezes aparece na cauda da curva de libertação, mas isto só acontece com cimentos com teores elevados de C_3A .

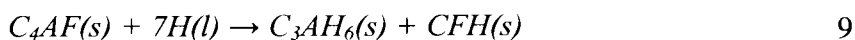
A formação de monosulfoaluminato resulta da combinação da etringite com C_3A ainda existente,



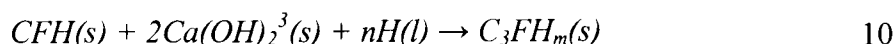
À medida que a etringite é consumida também se forma aluminato hidratado de cálcio hexagonal (C_4AH_{19}) que pode formar uma solução sólida com o monosulfoaluminato ($C_4\bar{A}\bar{S}H_{12}$) ou individualizar-se em cristais (Coutinho, 2006).

A adição de gesso não evita totalmente a reacção de hidratação directa do C_3A , apenas a atrasa.

A hidratação do C_4AF verifica-se durante o mesmo período da hidratação do C_3A e também envolve um composto intermédio com o gesso. Os produtos finais da hidratação de C_4AF são aluminatos tricálcicos hidratados e uma fase amorfa ferrítica. É possível também que parte do óxido de ferro (Fe_2O_3) esteja presente em solução sólida nos aluminatos tricálcicos hidratados. O C_4AF reagindo com a água liberta aluminato tricálcico e ferrato monocálcico (reacção 9). Este, reagindo com o hidróxido de cálcio já presente transforma-se em ferrato tricálcico (C_3FH_m) (reacção 10), que forma soluções sólidas com o aluminato tricálcico hidratado (C_3AH). Desta maneira o C_3A fica protegido da acção do ião sulfato, e por esta razão os cimentos resistentes à acção dos sulfatos devem conter uma proporção razoável de C_4AF (Coutinho, 2006).

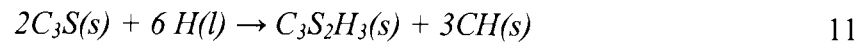


e



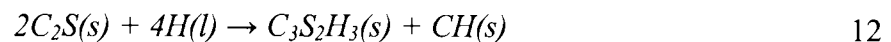
³ A portlandite ($Ca(OH)_2$) resulta da hidratação do CaO : $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$.

O C_3S ao reagir com a água liberta hidróxido de cálcio, uma parte da qual fica em solução, outra cristaliza. O silicato ao perder cálcio origina o bissilicato tricálcico ($C_3S_2H_3$) hidratado.



O produto desta reacção ($C_3S_2H_3$) é muitas vezes referido simplesmente como silicato de cálcio hidratado CSH e é responsável pela resistência atingida no cimento endurecido (Domone, 1994 in Coutinho, 2006). A hidratação do C_3S , como acima referido, leva à formação de hidróxido de cálcio, que corresponde a 40% do total dos produtos de hidratação da alite e 18% da belite (Coutinho, 2006).

Á semelhança do C_3S , o C_2S ao reagir com a água também liberta hidróxido de cálcio, embora em menor quantidade (cerca de 1/3 do libertado pelo C_3S) e transforma-se num outro silicato de cálcio hidratado (reacção 12) (Coutinho, 2006).



Capítulo 5 – Avaliação da Qualidade do Clínquer

Índice

5.1. Introdução	41
5.2. Composição química	41
5.2.1. Cal livre (CaO_{lv})	41
5.2.2. Óxido de magnésio (MgO)	41
5.2.3. Óxido de enxofre (SO_3)	42
5.2.4. Álcalis (K_2O e Na_2O)	42
5.2.5. Cloretos (Cl)	42
5.3. Módulos e índices químicos	43
5.3.1. Módulo hidráulico	43
5.3.2. Módulo silicioso	43
5.3.3. Módulo aluminoso	44
5.3.4. Índice de saturação em cal	44
5.3.5. Fase líquida	45
5.3.6. Índice de cozedura	45
5.4. Indicadores de Benchmarking	45
5.4.1. CUI (“Clinker Uniformity Index”)	45
5.4.2. KSUI (“Klin Sulphate Uniformity Index”)	46
5.4.3. FLUI (“Free Lime Uniformity Index”)	46
5.4.4. KFUI (“Klin Free Uniformity Index”)	46

5. Avaliação da qualidade do clínquer

5.1. Introdução

Existem diversos factores que influenciam a qualidade do clínquer e o conhecimento da sua composição química tem como intuito a determinação das proporções de matéria-prima a misturar de forma a obter um clínquer com uma determinada composição, química e mineralógica. A composição química refere-se a parâmetros como o índice de saturação, módulo silicioso e aluminoso, percentagem de álcalis, MgO e SO₃, quantidade de fase líquida e presença de mineralizadores.

5.2. Composição química

5.2.1. Cal livre (CaO_{lv})

A cal livre é a cal que não está combinada com outros elementos e um aumento significativo deste parâmetro reduz significativamente o tempo de presa, inicial e final. Para produzir um clínquer com a composição adequada, o cru deve conter cal necessária para:

- Formar o C₂S com toda a sílica e transformar parte do C₂S em C₃S;
- Formar o C₄AF com o Fe₂O₃ e parte do Al₂O₃;
- Formar o C₃A com a restante alumina (CimporTec, 2004).

5.2.2. Óxido de magnésio (MgO)

O MgO resulta do carbonato de magnésio que se encontra associado ao carbonato de cálcio das matérias-primas. O seu efeito é semelhante ao da cal livre, uma vez que a sua hidratação dá origem à formação de cristais de hidróxido de magnésio, que ocupam mais volume do que o óxido. Se o arrefecimento do clínquer for rápido evita-se este efeito indesejável. (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

5.2.3. Óxido de enxofre (SO₃)

O SO₃, componente minoritário, resulta do enxofre presente nos combustíveis e em pequena parte dos compostos de enxofre das matérias-primas. É responsável por parte da volatilização e quando hidratado actua como regulador de presa (CimporTec, 2004).

5.2.4. Álcalis (K₂O e Na₂O)

A saturação molar dos álcalis pelo SO₃ facilita a trabalhabilidade do cimento, contudo se existirem mais álcalis que sulfatos essa trabalhabilidade tende a diminuir. Estes afectam a fase líquida e não favorecem as resistências a 28 dias. É importante controlar o teor em álcalis na farinha do ciclone 4 e se esse valor for inferior a 2% não influenciará o mecanismo de formação do C₃S, não influenciando assim as propriedades do clínquer (CimporTec, 2004). Devem ser igualmente controlados para diminuir as incrustações na zona do ciclone 4, uma vez que os sulfatos e cloretos alcalinos constituem o chamado ciclo dos voláteis, cuja acumulação pode conduzir a incrustações elevadas que levem ao bloqueamento dos ciclones e obriguem a paragem da linha.

5.2.5. Cloretos (Cl)

No que diz respeito aos cloretos, os desvios em relação ao valor esperado podem causar problemas operacionais e causar a corrosão das armaduras, que são efeitos indesejáveis. É importante controlar o teor em cloretos na farinha do ciclone 4 devido, principalmente, à probabilidade de incrustações (CimporTec, 2004).

5.3. Módulos e índices químicos⁴

5.3.1. Módulo hidráulico

Este módulo, indica a dificuldade que haverá na cozedura e conseqüentemente fornece informação sobre o consumo de combustível. Quanto maior for o seu valor maior será a dificuldade na cozedura, por outro lado para valores muito baixos ($MH < 1,7$), apesar de maior facilidade na cozedura, o cimento tem resistências baixas (CimporTec, 2004).

$$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad 5$$

5.3.2. Módulo silicioso

Este módulo está relacionado com o desenvolvimento de uma fase líquida durante a cozedura, pois Al_2O_3 e Fe_2O_3 são fundentes. Quando é elevado ($MS > 3$) a cozedura é mais difícil porque a percentagem de fase líquida é menor. Assim o clínquer é pulverulento e prejudica a marcha do forno, pois são necessárias temperaturas de cozedura superiores. Quando é baixo ($MS < 2$) a cozedura é mais fácil mas a fase líquida aumenta e pode levar a baixas resistências no cimento (CimporTec, 2004).

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad 6$$

⁴ Nas fórmulas os símbolos referem-se às percentagens dos óxidos na totalidade e não aos seus pesos moleculares.

5.3.3. Módulo aluminoso

Este módulo está relacionado com a viscosidade da fase líquida, isto é, quanto menor o valor de MA, menor a viscosidade da fase líquida, o que por conseguinte facilita a mobilidade dos óxidos. Para valores elevados ($MA > 2,5$) a viscosidade torna-se elevada na fase líquida e dificulta a formação de C_3S . Para valores muito baixos aumenta a formação de C_4AF (CimporTec, 2004).

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad 7$$

5.3.4. Índice de saturação em cal

Este índice indica a relação entre o CaO e os restantes óxidos. Se o CaO for muito elevado nem todo se combina e aparece demasiada cal livre (o que não é desejável). Se o IS for muito elevado dificulta a cozedura e incrementa o consumo de combustível. O valor do IS deve ser próximo de 100 (CimporTec, 2004).

$$LSF \text{ ou } IS = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3} \quad 8$$

Um outro índice que também mede a saturação em cal (mas não é tão usual) é o delta e é analisado de forma inversa ao IS, ou seja, se o Δ for muito negativo o CaO é muito elevado e proporciona igualmente o aparecimento de demasiada cal livre. Quanto mais baixo for o Δ mais difícil será o processo de cozedura (CimporTec, 2004).

$$\Delta = \frac{2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 - CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO} \times 100 \quad 9$$

5.3.5. Fase líquida

O valor óptimo da fase líquida deverá ser 25%. Se for inferior a 20% o processo de cozedura é dificultado e não existe crosta no forno, o que pode danificar o refractário. Por sua vez, se este valor for superior a 30%, apesar de ser fácil cozer, existe demasiada crosta, o que pode igualmente danificar o refractário (CimporTec, 2004).

$$FL = 3Al_2O_3 + 2,25Fe_2O_3 + MgO + SO_3 + K_2O + Na_2O \quad 10$$

5.3.6. Índice de cozedura

Este não é um parâmetro muito usual, mas significa que quanto maior for o IC mais difícil será a cozedura (CimporTec, 2004).

$$IC = \frac{C_3S}{C_4AF + C_3A} \quad 11$$

5.4. Indicadores Benchmarking⁵

5.4.1. CUI (“Clinker Uniformity Index”)

O CUI mede a uniformidade do clínquer produzido no forno através do C₃S. Resulta da média da diferença ao quadrado entre o C₃S do clínquer produzido no forno e a média mensal do C₃S. O valor óptimo deste parâmetro deve ser inferior a 16 (CimporTec, 2004).

$$CUI = \frac{\sum (C_3S - X C_3S)^2}{n} \quad 12$$

⁵ São indicadores de qualidade do produto formado, nomeadamente da sua uniformidade e indicam a regularidade química da farinha produzida e do clínquer obtido, o que indica também a estabilidade e controlo da operação de cozedura.

5.4.2. KSUI (“Klin Sulphate Uniformity Index”)

O KSUI avalia a volatilização do enxofre no forno na forma de SO_3 . Resulta da divisão do desvio padrão mensal do SO_3 pela média mensal do SO_3 . O valor óptimo é inferior a 10 (CimporTec, 2004).

$$KSUI = \frac{SIG\ SO_3 * 100}{1 + XSO_3} \quad 13$$

5.4.3. FLUI (“Free Lime Uniformity Index”)

O FLUI mede a uniformidade do clínquer produzido no forno através da cal livre. Resulta da divisão do desvio padrão mensal da cal livre pela média mensal da cal livre. O valor óptimo deste parâmetro é ser inferior a 1 (CimporTec, 2004).

$$FLUI = \frac{SIG\ CaO_{lv}}{0,2 * X\ CaO_{lv} + 0,1} \quad 14$$

5.4.4. KFUI (“Klin Free Uniformity Index”)

O KFUI mede a uniformidade da farinha de alimentação ao forno através do C_3S . Resulta da média da diferença ao quadrado entre o C_3S do cru e o C_3S objectivado. O valor óptimo deste parâmetro deve ser inferior a 14 (CimporTec, 2004).

$$KFUI = \frac{\sum (C_3S - C_3S_{obj})^2}{n} \quad 15$$

Capítulo 6 – Ciclo dos Álcalis

Índice

6.1. Introdução	49
6.2. Enxofre	49
6.3. Cloretos	50
6.4. Consequências da volatilização	51

6. Ciclo dos álcalis

6.1. Introdução

A qualidade do clínquer é influenciada pelo ciclo de voláteis, como referido anteriormente. Vários componentes menores das matérias-primas e combustíveis são em maior ou menor expansão volatilizados a elevadas temperaturas no forno, e condensados nas poeiras ou nas paredes em zonas mais frias do forno ou do circuito de moagem. Compostos que são reabsorvidos para o sistema tomam parte dos ciclos de volatilização. Os álcalis (Na_2O e K_2O), o enxofre e os cloretos são de extremo interesse operacional (Martins, 1996; Alexandre, 2004). Os álcalis podem ter uma influência positiva no processo de clínquerização, resultando um aumento de fase líquida e uma diminuição da temperatura de formação dos minerais do clínquer.

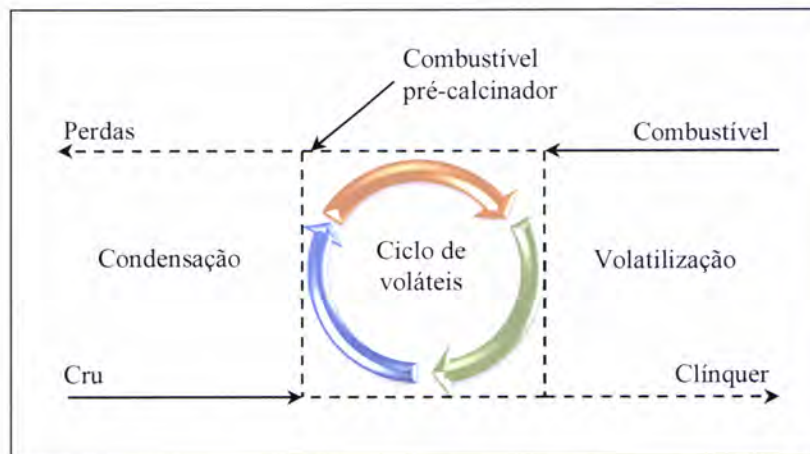


Figura 11: Esquemática do ciclo de voláteis (CimporTec, 2003).

6.2. Enxofre

A partir do enxofre do combustível e do cru gera-se SO_2 (gasoso), que se combina com os álcalis volatilizados presentes também nos gases do forno, produzindo sulfatos alcalinos (Na_2SO_4 e K_2SO_4) que se depositam nas paredes frias da torre de pré-aquecimento. Os

sulfatos alcalinos condensados retornam e saem com o clínquer, devido à sua fraca volatilidade.

Se não houver SO_2 suficiente para se combinar com a totalidade dos álcalis originam-se ciclos fechados de carbonatos alcalinos, facilmente volatilizáveis. Os carbonatos alcalinos, desde que não estejam combinados com as fases do clínquer, volatilizam de novo. Se, por outro lado, houver um excesso de SO_2 , este pode reagir com o CaCO_3 nos ciclones, originando CaSO_4 e regressando ao processo. Este decompõe-se e regressa ao circuito de SO_2 nos gases. No entanto, existe uma pequena fracção que é integrada no clínquer sob a forma de CaSO_4 .

A existência de excesso de álcalis no cru, em relação à quantidade que se pode combinar com o enxofre, apresenta a vantagem de se poder usar combustíveis ricos em enxofre sem existir o perigo de uma emissão significativa de SO_2 nos gases da chaminé. Por outro lado, o sulfato alcalino combinado nas fases do clínquer é vantajoso para as resistências iniciais do cimento (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

6.3. Cloretos

Nos fornos rotativos o cloro reage com os álcalis formando cloretos (NaCl e KCl) que são transportados nos gases e precipitam nos ciclones e à entrada do forno. Retornam com o material de reacção. Mas, no entanto a sua diferença relativamente aos sulfatos é que são de novo vaporizados sem incorporarem o clínquer. Assim, devido a este ciclo e ao facto de não saírem com o clínquer, forma-se um circuito fechado, que devido aos “agarramentos” ou à formação de crostas no forno, é interrompido (Martins, 1996; Alexandre, 2004).

6.4. Consequências da volatilização

O enriquecimento em álcalis, sobretudo K_2O , sulfatos e cloretos, é a principal causa da formação de incrustações na câmara de fumos e na torre de ciclones. Nestas condições têm de ser instalados equipamentos especiais, como canhões de ar, ou é necessário efectuar uma limpeza manual. Seja como for, resulta numa redução da produção ou mesmo numa paragem do forno.

Se o teor em álcalis for muito elevado a energia necessária para evaporar os compostos voláteis é maior. Teores elevados de álcalis provocam a infiltração dos sulfatos alcalinos (K_2SO_4 e Na_2SO_4) e cloretos de potássio (KCl) nos refractários. Os poros abertos por essa infiltração são posteriormente ocupados por clínquer fundido, aumentando a sua densidade, bem como o risco de fissuração (Martins, 1996; Alexandre, 2004).



Capítulo 7 – Metodología

Índice

7.1. Amostragem	56
7.1.1. Resumo do processo	56
7.1.2. Procedimento experimental	56
7.2. Determinação da perda ao fogo	56
7.2.1. Resumo do processo	56
7.2.2. Equipamentos e material	57
7.2.3. Procedimento experimental	57
7.2.4. Determinação da perda ao fogo	57
7.3. Determinação do teor em cal livre	58
7.3.1. Resumo do processo	58
7.3.2. Equipamentos, material e reagentes	58
7.3.3. Procedimento experimental	59
7.3.4. Determinação do teor em cal livre	59
7.4. Análise química por fluorescência de raios X	59
7.4.1. Resumo do processo	59
7.4.2. Equipamentos, material e reagentes	60
7.4.3. Procedimento experimental	60
7.4.4. Determinação da análise química	61
7.5. Determinação do teor em cloretos	61
7.5.1. Resumo do processo	61
7.5.2. Equipamentos, material e reagentes	62
7.5.3. Procedimento experimental	62
7.5.4. Determinação do teor em cloretos	63
7.6. Determinação do teor em sódio do fotometria de chama	63
7.6.1. Resumo do processo	63
7.6.2. Equipamentos, material e reagentes	64
7.6.3. Procedimento experimental	65
7.6.4. Determinação do teor em sódio	65

7. Metodologia

A metodologia descreve os métodos a adoptar de forma a obter determinados parâmetros, nomeadamente o teor em cal livre, cloretos, sódio, potássio, cal, sílica, alumina, ferro, magnésio e enxofre. O quadro que se segue ilustra sucintamente os métodos laboratoriais utilizados.

Ensaio Experimental				
Perda ao Fogo	Cal livre	Análise química	Cloretos	Sódio
Métodos				
Análise termo-gravimétrica	Titulação	Fluorescência de raios X	Filtração e titulação por retorno	Fotometria de chama
Resultados				
Perda de massa	Teor em cal livre (CaO _{lv})	Teor em CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MgO, K ₂ O e SO ₃	Teor em cloretos (Cl)	Teor em sódio (Na ₂ O)

Figura 12: Quadro resumo dos métodos utilizados.

7.1. Amostragem

7.1.1. Resumo do processo

De modo a possibilitar a preparação do trabalho relativo à reactividade do clínquer foi necessário caracterizar a situação do forno antes e após a mudança da motorização do forno, em ambos os períodos de monitorização.

7.1.2. Procedimento experimental

1. Colher amostras de aproximadamente 2kg de três zonas específicas do processo:
 - Clínquer à saída do arrefecedor;
 - Farinha do ciclone 4;
 - Farinha de alimentação ao forno.
2. Fazer a amostragem de 2 em 2h durante um período de 72h.

7.2. Determinação da perda ao fogo

7.2.1. Resumo do processo

Por análise termo-gravimétrica, faz-se a determinação da perda de massa, por calcinação a $950 \pm 25^\circ\text{C}$ em atmosfera oxidante⁶.

⁶ Em atmosfera oxidante são eliminados o dióxido de carbono e água e oxidados os elementos oxidáveis eventualmente presentes.

7.2.2. Equipamentos e material

- ↳ Cadinho de porcelana;
- ↳ Balança (sensível a 0,1mg);
- ↳ Mufla (com a capacidade de manter a temperatura a $950 \pm 25^\circ\text{C}$);
- ↳ Exsicador.

7.2.3. Procedimento experimental

1. Pesar aproximadamente 1g de amostra num cadinho de porcelana, previamente tarado.
2. Colocar o cadinho na mufla a $950 \pm 25^\circ\text{C}$, durante 20min.
3. Retirar o cadinho da mufla e colocar no exsicador.
4. Deixar arrefecer e pesar novamente.
5. Calcular a perda ao fogo.

7.2.4. Determinação da perda ao fogo

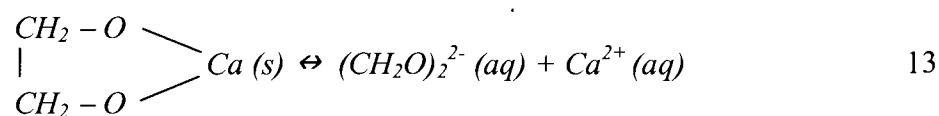
$$PF = \frac{100 (m_2 + m_3)}{m_2 - m_1} \quad 16$$

Onde m_1 corresponde à massa do cadinho vazio, m_2 à massa do cadinho + amostra e m_3 à massa do cadinho + amostra depois da calcinação na mufla.

7.3. Determinação do teor em cal livre ⁷

7.3.1. Resumo do processo

Determinação dos teores em CaO e Ca(OH)₂ não combinados, fazendo a sua extracção com um solvente orgânico, o etilenoglicol. Este ao combinar-se com o CaO ou com o Ca(OH)₂ forma um sal, o glicolato de cálcio, que se dissocia facilmente (equação 17).



Por titulação, o (CH₂O)₂²⁻ formado é doseado acidimetricamente com ácido benzóico na presença da fenolftaleína.

7.3.2. Equipamentos, material e reagentes

- ↪ Erlenmeyer de 250ml;
- ↪ Balança analítica (sensível a 0,1mg);
- ↪ Estufa;
- ↪ Etilenoglicol p.a. (CH₂OHCH₂OH);
- ↪ Solução alcoólica de fenolftaleína a 1% (C₂₀H₁₄O₄);
- ↪ Solução alcoólica anidra de ácido benzóico 0,1M (C₆H₅COOH).

⁷ A determinação do teor em cal livre só é feita para a amostragem do clínquer.

7.3.3. Procedimento experimental

1. Pesar 0,5g de amostra de clínquer, previamente moída (num moinho de anéis – figura II.1) e peneirada, para facilitar o ataque do etilenoglicol, num erlenmeyer.
2. Adicionar 25ml de etilenoglicol e homogeneizar.
3. Colocar o erlenmeyer tapado na estufa durante 20min a 75°C.
4. Retirar o erlenmeyer da estufa, colocar 12 gotas de fenolftaleína e titular com ácido benzóico até à viragem.

7.3.4. Determinação do teor em cal livre

$$CaO_{lv} (\%) = \text{volume } \acute{a}c.\text{benz\`oico gasto} \times F_c \quad 17$$

Onde F_c corresponde ao factor de correcção do ácido benzóico.

7.4. Análise química por fluorescência de raios X

7.4.1. Resumo do processo

A fluorescência de raios X é uma técnica analítica multielementar e não destrutiva usada para obter informações qualitativas e quantitativas da composição elementar das amostras. Esta metodologia é baseada na produção e detecção de raios X característicos emitidos pelos elementos constituintes da amostra.

A espectrometria de fluorescência de raios X é fundamentada em curvas de calibração, obtidas a partir de análises de raios X de amostras previamente analisadas por processo químico convencional (padrões). Por este método determinam-se as percentagens dos seguintes elementos: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O e SO₃, através de uma radiação característica emitida pelo elemento que se deseja analisar.

7.4.2. Equipamentos, material e reagentes

- ↪ Balança analítica (sensível a 0,1mg);
- ↪ Peroladora (figura II.2);
- ↪ Cadinho de platina/ouro;
- ↪ Lingoteira de platina/ouro;
- ↪ Espectrómetro de raios X S4 Pioneer com fonte radioactiva de Ródio e o detector é um fio de ouro (figura II.3);
- ↪ Tetraborato de lítio p.a. ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$);
- ↪ Metaborato de lítio p.a. (LiBO_2);
- ↪ Iodeto de sódio p.a. (NaI);
- ↪ Fundente (76% $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + LiBO_2)

7.4.3. Procedimento experimental

7.4.3.1. Preparação das amostras

1. Calcular a quantidade de amostra a pesar em função da perda ao fogo, através da expressão: $m(\text{pesar}) = 100/(100-PF)$.
2. Adicionar 7,68g de fundente e 0,32g de iodeto de sódio.
3. Colocar num cadinho de platina/ouro e homogeneizar.
4. Colocar na peroladora e aguardar.
5. Retirar a pérola e deixar arrefecer.

7.4.3.2. Análise Química

1. Colocar a pérola num porta amostras e seguidamente numa das posições do espectrómetro de fluorescência de raios X.
2. Iniciar a leitura de raios X.

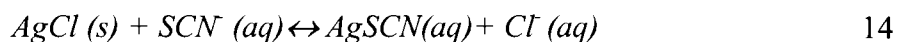
7.4.4. Determinação da análise química

O software do espectrómetro de fluorescência de raios X identifica os picos dos vários elementos e quantifica por integração dos mesmos de acordo com a calibração pré efectuada.

7.5. Determinação do teor em cloretos ⁸

7.5.1. Resumo do processo

A solução de cloretos é tratada com um excesso de solução de nitrato de prata e o nitrato de prata residual é determinado por titulação de retorno com uma solução padrão de tiocianato de amónio. Como o cloreto de prata é mais solúvel do que o tiocianato de prata, reage com o tiocianato de acordo com a equação,



antes da reacção com o indicador (iões Fe^{3+}) havendo conseqüentemente, um erro na titulação. Assim, é necessário remover o cloreto de prata por filtração ou adicionar um pouco de nitrobenzeno. As partículas de cloreto ficarão envolvidas por uma película de nitrobenzeno, permitindo a sua quantificação.

⁸ A determinação do teor em cloretos só é feita para a amostragem da farinha do ciclone 4.

7.5.2. Equipamentos, material e reagentes

- ↳ Copos de precipitação de 200 e de 400ml em vidro;
- ↳ Balão volumétrico de 200ml em vidro;
- ↳ Pipetas de 1, 5, 10 e 20ml;
- ↳ Buretas de 10ml;
- ↳ Cadinho de níquel;
- ↳ Funil e filtro nº 40;
- ↳ Placa de aquecimento;
- ↳ Água destilada;
- ↳ Solução de nitrato de prata a 0,0282N (AgNO_3);
- ↳ Solução de tiocianato de amónio a 0,0282N (NH_4SCN);
- ↳ Nitrobenzeno p.a. ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$);
- ↳ Ácido nítrico 65% (HNO_3);
- ↳ Indicador sulfato férrico a 10% em H_2O ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{S}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$).

7.5.3. Procedimento experimental

7.5.3.1. Ataque directo do ácido nítrico

1. Pesar 0,5g de amostra de farinha do ciclone 4 para copo de 200ml, juntar 100ml de água destilada e 20 ml de ácido nítrico concentrado;
2. Aquecer (para dissolução completa do material) e, aquando da ebulição adicionar 10ml da solução de nitrato de prata;
3. Deixar ferver durante 1 minuto;
4. Filtrar a solução para copo de 200ml, deixar arrefecer e diluir a solução para um volume total de 400 ml.

7.5.3.2. Precipitação e titulação do nitrato de prata residual

1. À solução resultante do ataque adicionar 1ml de nitrobenzeno, 10ml de indicador de sulfato férrico;
2. Agitar vigorosamente num agitador magnético para coagular o precipitado;
3. Titular o nitrato de prata residual com tiocianato de amónio até ao ponto de viragem, em que permanece uma cor castanha avermelhada fraca.

7.5.4. Determinação do teor em cloretos

$$Cl(\%) = 0,1(v-v_1-v_2) / n \quad 18$$

Onde v corresponde ao volume de nitrato de prata, v_1 ao de tiocianato de amónio, v_2 ao de tiocianato de amónio gasto no ensaio em branco e n corresponde à massa de amostra utilizada.

7.6. Determinação do teor em sódio por fotometria de chama ⁹

7.6.1. Resumo do processo

A fotometria de chama é a mais simples das técnicas analíticas baseadas em espectroscopia atómica. Neste caso, a amostra contendo catiões metálicos é inserida numa chama e analisada pela quantidade de radiação emitida pelas espécies atómicas ou iónicas excitadas. Os átomos expostos a alta temperatura de uma chama sofrem excitação. O retorno ao equilíbrio faz-se por emissão luminosa monocromática, característica de cada átomo.

Ao introduzir um elemento numa chama, vaporiza-se a solução do sal correspondente. A quantidade de solução que atravessar a chama é constante e as intensidades das radiações emitidas são função da concentração da solução.

⁹ A determinação do teor em sódio só é feita para a amostragem da farinha do ciclone 4.

A radiação é seleccionada por um filtro correspondente ao elemento a dosear e a sua intensidade de luz é medida por uma célula e um dispositivo. O aparelho é composto por:

- ↳ Um pulverizador com agulha onde se introduz a solução salina;
- ↳ Um queimador utilizando gás e ar vindo de um pulverizador;
- ↳ Um sistema para selecção da radiação com filtros coloridos interferentes, monocromáticos;
- ↳ Um sistema digital de leitura do fluxo luminoso (Okamura; Cavalheiro; Nóbrega, 2004).

7.6.2. Equipamentos, material e reagentes

- ↳ Balança (sensível a 0,1 mg);
- ↳ Banho de areia;
- ↳ Fotómetro de chama (figura II.5);
- ↳ Cápsula de platina;
- ↳ Tubos de ensaio em polietileno;
- ↳ Balão de 200ml;
- ↳ Bureta de 50ml;
- ↳ Pipeta de 5ml e de 10ml;
- ↳ Proveta graduada de 10ml;
- ↳ Água destilada;
- ↳ Solução de ácido perclórico 72% (HClO_4);
- ↳ Solução de ácido fluorídrico 48% (HF);
- ↳ Solução de ácido fosfórico 85% (H_3PO_4);
- ↳ Solução de ácido clorídrico 1:1 v/v (HCl);
- ↳ Solução cloreto de cálcio a 63 g/l em CaO (CaCl_2).

7.6.3. Procedimento experimental

1. Pesar 1g de amostra de farinha do ciclone 4 numa cápsula de platina e proceder ao ataque da amostra com a adição de 6 a 8 ml de ácido perclórico e 10ml de ácido fluorídrico.
2. Colocar no banho de areia até ao desaparecimento de fumos brancos.
3. Retirar, deixar arrefecer e retomar com 10ml de ácido clorídrico.
4. Retirar, deixar arrefecer e filtrar a solução para um balão de 200ml.
5. Adicionar à solução 0,5ml solução de cloreto de cálcio, 5ml de ácido fosfórico e aferir com água destilada.
6. Homogeneizar bem e proceder à leitura no fotómetro de chama.

7.6.4. Determinação do teor em sódio

Os resultados são dados directamente por interpolação às leituras dos padrões para 1g.

Capítulo 8 – Apresentação e Discussão dos Resultados

Índice

8.1. Formação da pilha	69
8.2. Análise química	73
8.2.1. Análise química da farinha de alimentação ao forno	73
8.2.2. Análise química do ciclone 4	75
8.2.3. Análise química do clínquer	76
8.3. Módulos químicos	79
8.4. Indicadores de Benchmarking	82
8.5. Parâmetros do processo	83
8.6. Energia	88
8.7. Moagem de cimento	89

8. Apresentação e discussão dos resultados

8.1. Formação da pilha

A construção de pilhas é a forma adequada para homogeneizar as matérias-primas, de modo a que o teor em CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 seja o pretendido.

O calcário, fonte de CaO , provém directamente da exploração da pedreira e o seu teor na constituição da pilha deve ser aproximadamente 80%. Normalmente o calcário está contaminado com uma pequena percentagem de magnésio (expresso sob a forma de MgCO_3), e se o teor em magnésio for elevado (>2%) não pode ser utilizado como fonte de matéria-prima.

O xisto, rico em SiO_2 e Al_2O_3 (contém também pequenas quantidades de ferro, cálcio e magnésio), deve ser inferior a 8% na constituição da pilha. É muito importante que não exceda muito este valor, uma vez que o xisto contém pirite (FeS_2) e a sua oxidação liberta SO_2 , o que do ponto de vista ambiental causa um impacto negativo e existem limites legais a cumprir.

As escórias de ferro constituem uma fonte de Fe_2O_3 e não devem exceder 1,5% na constituição da pilha, pois acima deste valor não se combinaria de forma adequada no processo.

As cinzas volantes (cinzas de cinzeiro), fonte de silica e alumínio, são provenientes de uma central termoeléctrica e correspondem a 5%, aproximadamente, da constituição da pilha.

A areia é uma fonte de SiO_2 e a sua presença na pilha deve corresponder a uma percentagem inferior a 4%, pois se exceder muito este valor é bastante difícil de moer, e como tal aparecem

nódulos que diminuem a aptidão da farinha à cozedura e, conseqüentemente, incrementam o consumo energético.

As lamas de ETA's são uma fonte de sílica e alumina e correspondem a aproximadamente 1% da constituição da pilha. Este valor está meramente relacionado com o ritmo de recepção da matéria-prima. Podem existir alturas em que existe um aumento.

A quantidade de resíduos diversos está também relacionada com o ritmo de recepção. No período pré-paragem costumava corresponder a aproximadamente 2% da pilha, contudo, no período pós-paragem esse valor sofreu um aumento de 4%, podendo passar a ser de, aproximadamente 6%.

O “filler” calcário, como o próprio nome indica, é uma fonte rica em calcário e não existe um valor definido para esta matéria, uma vez que são adicionadas pequenas quantidades. Este “filler” resulta da britagem do calcário com destino a brita, e tendo em consideração que os resíduos muito finos não são utilizados para este fim podem ser reutilizados na formação da pilha.

Na figura 13 pode analisar-se a constituição das pilhas utilizadas durante os períodos de monitorização (período de pré-paragem e período de pós-paragem) e observar que a sua constituição é relativamente homogénea, não variando muito de pilha para pilha.

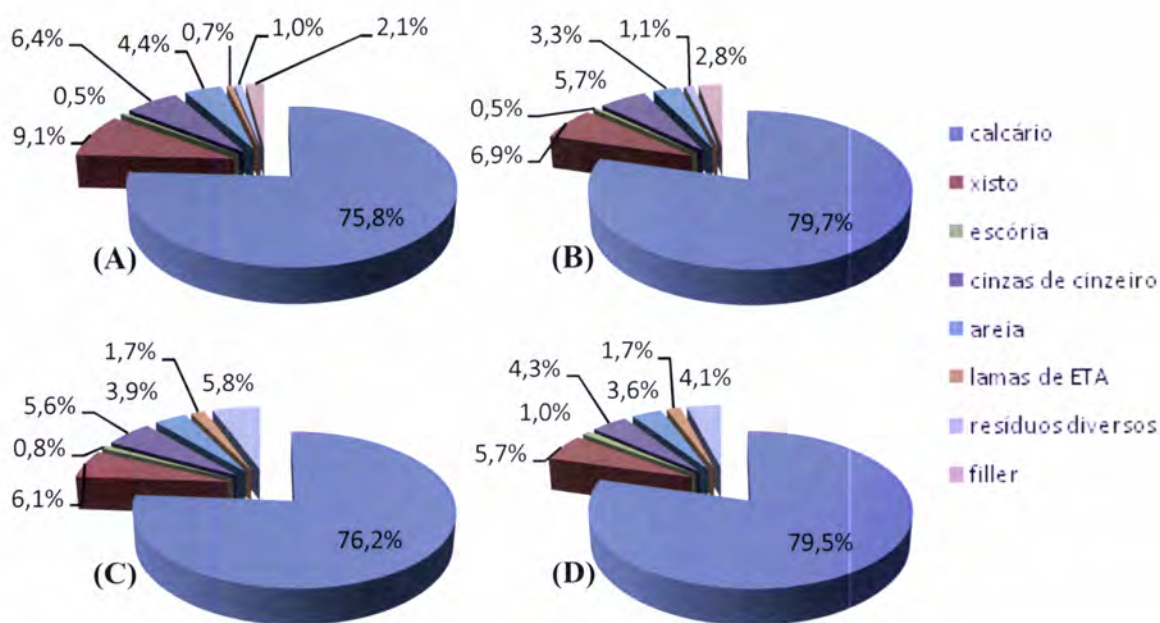


Figura 13: Diagramas representativos da formação de uma pilha. (A) e (B) correspondem ao período de pré-paragem e (C) e (D) ao de pós-paragem. (A) corresponde à pilha utilizada nos dias 8.05.08 e 9.05.08 e (B) à pilha utilizada nos dias 9.05.08 a 11.05.08. Por sua vez, (C) corresponde à pilha utilizada nos dias 4.07.08 e 5.07.08 e (D) à pilha utilizada nos dias 5.07.08 e 6.07.08.

A análise química de uma pilha é efectuada de minuto a minuto por recurso a um analisador on-line de raios γ , o Asys. É a partir desta análise que se controla e corrige a pilha no que respeita a matérias-primas. Nas tabelas III.1 e III.3 encontram-se as análises químicas referentes a cada uma das pilhas. Existem valores de referência para uma correcta análise (Tabela 2), com os quais se pode efectuar a correcção do teor em sílica com a areia, do teor em ferro com escória de ferro e do de cálcio com o calcário.

Tabela 2: Limites de controlo relativos à análise química de uma pilha.

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)
LSC	13,55	3,86	2,10	43,50
LIC	13,35	3,76	2,00	43,10

Relativamente ao teor dos elementos minoritários existem igualmente parâmetros de controlo, nomeadamente, o MgO deve ser inferior a 5,0%, o SO₃ deve ser inferior a 0,3%, e o Cl⁻ deve ser inferior a 1,0%.

Na prática, pequenos desvios a estes valores não significam uma má constituição da pilha, devendo também analisar-se os módulos químicos (tabela III.2 e 5 do anexo III.4), que têm igualmente parâmetros de controlo (Tabela 3). O objectivo é obter um valor que se encontre dentro dos limites de controlo e é imposto pela fábrica, através da experiência e conhecimento do processo. Este é definido consoante as características do processo. Contudo após a alteração efectuada ainda não foi revisto, sendo que, no período de pós-paragem, apesar de os resultados serem representativos de um melhoramento, podem afastar-se mais do valor objectivo.

Tabela 3: Limites de controlo relativos aos módulos químicos de uma pilha.

	LSF (%)	MS (%)	MA (%)
LSC ¹⁰	101,5	2,45	2,02
Objectivo	100,0	2,30	1,87
LIC ¹¹	98,5	2,15	1,72

Se o teor em SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ estiver um pouco elevado e o teor em CaO se encontrar dentro dos limites de controlo será de prever valores de LSF um pouco baixos, uma vez que, como se pode ver na equação 8, o LSF depende directamente do teor em CaO e inversamente do teor em SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Contudo se o MS e o MA estiverem na gama pretendida significa que pequenos desvios do LSF da pilha não serão prejudiciais ao processo.

¹⁰ LSC = Limite Superior de Controlo.

¹¹ LIC = Limite Inferior de Controlo.

8.2. Análise química

A análise por fotometria de fluorescência de raios X permite quantificar as amostras e estimar o teor em CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O e SO₃. Por outro lado, os íons cloreto e o sódio são analisados por recurso a titulação por retorno e fotometria de chama, respectivamente.

A perda ao fogo permite analisar a perda de massa ao longo do processo, à medida que as reacções decorrem, obtendo-se valores para a farinha de alimentação ao forno, ciclone 4 e clínquer de aproximadamente, 35%, 5% e 0,5%, respectivamente.

De um modo geral, pode afirmar-se que o teor em CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e MgO foi constante ao longo de ambos os períodos de monitorização (como comprovam os pontos 8.2.1., 8.2.2. e 8.2.3.), tendo em consideração que o processo de produção de cimento é contínuo, existindo pequenos ajustes que são feitos em várias alturas do processo. Por outro lado, o comportamento do SO₃, K₂O, Na₂O e Cl⁻ é menos constante e mais cíclico uma vez que estes compostos estão envolvidos no ciclo de voláteis (Capítulo 6). O anexo IV contém as tabelas relativas à análise química da farinha de alimentação ao forno, da farinha do ciclone 4 e do clínquer.

8.2.1. Análise química da farinha de alimentação ao forno

Na farinha de alimentação ao forno a presença dos componentes maioritários (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e CaO) é muito constante entre o período de pré-paragem e o período de pós-paragem, o que é perceptível pela análise do gráfico 1.A, que evidencia a comparação entre a média de ambos os ciclos.

No entanto, em relação aos componentes minoritários (MgO , SO_3 e K_2O) existe uma ligeira diferença de valores em relação ao MgO e ao SO_3 (Gráfico 1.B). No que respeita ao MgO , que se encontra associado ao calcário das matérias-primas, é superior no período pós-paragem, pois a constituição das pilhas referentes a este período têm uma percentagem de calcário ligeiramente superior (Figura 13). Em relação ao SO_3 , que resulta dos combustíveis e das matérias-primas, é ligeiramente superior no período de pré-paragem. Isto acontece uma vez que o SO_3 entra no ciclo de voláteis e no período de pré-paragem a volatilização do enxofre era superior, incrementando o seu valor, o que de modo algum é positivo devido à probabilidade de “agarramentos” nos ciclones e no forno.

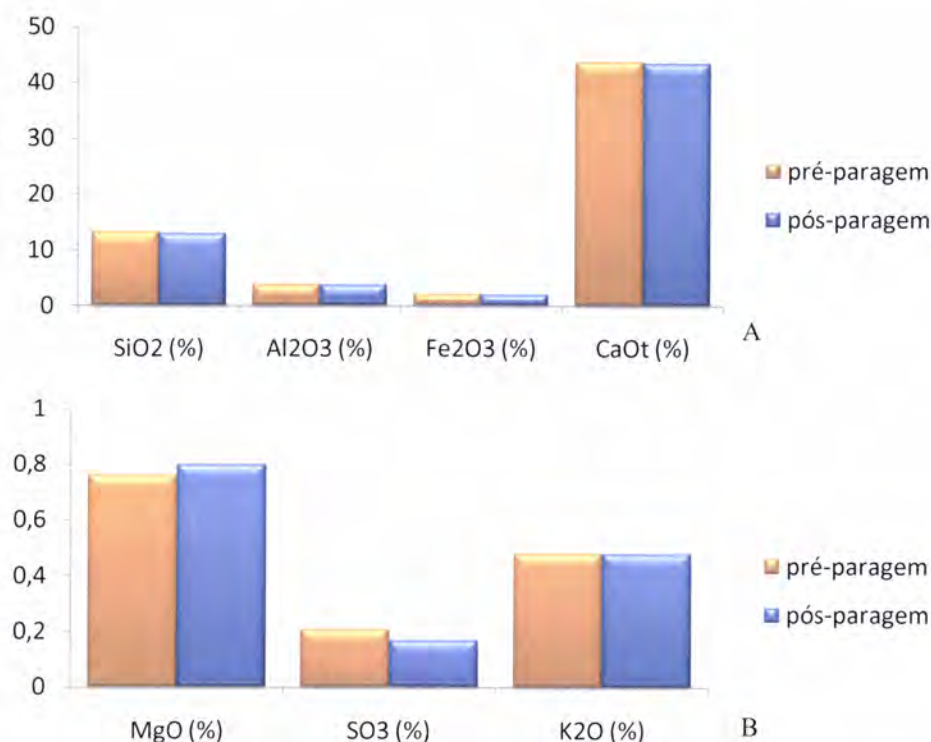


Gráfico 1: Farinha de alimentação ao forno: representação dos componentes maioritários (A) e minoritários (B) respectivos aos dois períodos de monitorização.¹²

¹² Os gráficos representados neste capítulo equiparam valores médios respectivos ao período de pré-paragem e ao período de pós-paragem.

8.2.2. Análise química da farinha do ciclone 4

A análise da farinha do ciclone 4, apesar de ser uma etapa do processo de extrema importância para uma boa condução do forno, é uma etapa de transição onde apenas se pretende verificar a estabilidade do processo. Através da análise do gráfico 2, pode verificar-se que a presença de compostos maioritários e minoritários é muito constante. No entanto, é de salientar a diferença em relação ao SO_3 , justificável analogamente à farinha de alimentação ao forno (ciclo de voláteis).

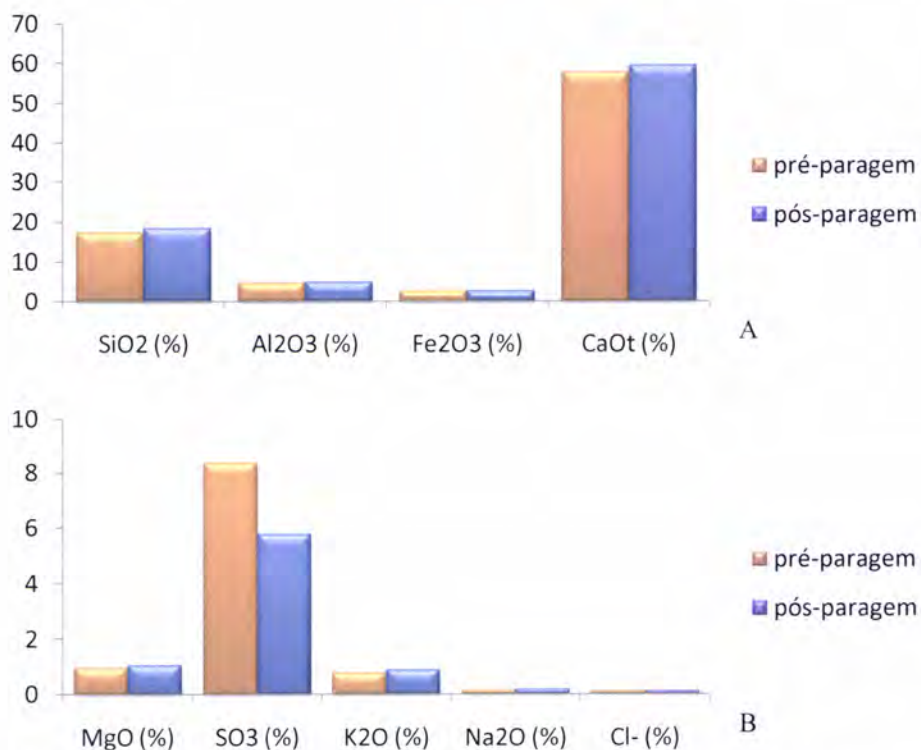


Gráfico 2: Farinha do ciclone 4: representação dos componentes maioritários (A) e minoritários (B) respectivos aos dois períodos de monitorização.

A percentagem de SO_3 no material do ciclone 4 é muito elevada em ambos os ciclos e encontra-se acima do limite a partir do qual se considera existir uma severa formação de “agarramentos” (Gráfico 3), com necessidade de uma limpeza muito frequente da câmara de fumos. Contudo, como o teor de cloretos é bastante baixo (sendo admissíveis valores até 2%) contribui de uma forma bastante positiva para a diminuição desses mesmos “agarramentos”.

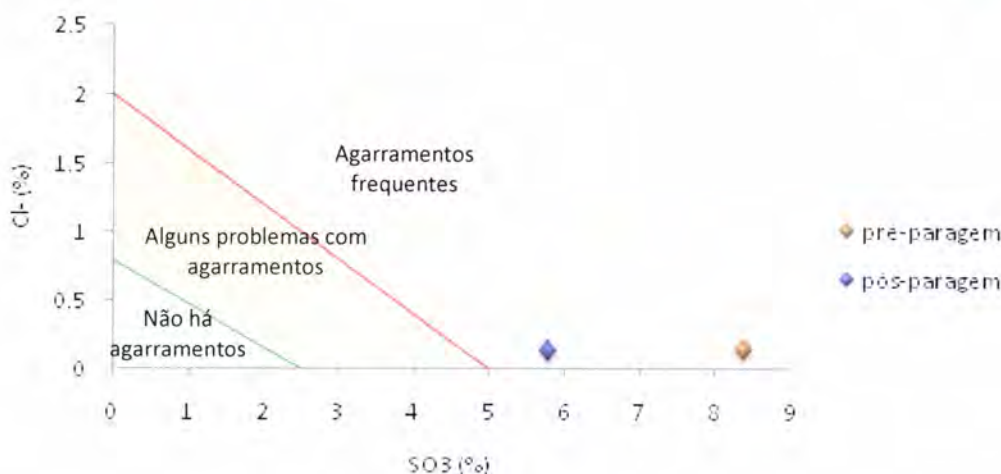


Gráfico 3: Probabilidade de “agarramentos” no pré-aquecedor, em ambos os ciclos de monitorização.

Um dos factores expectáveis ao aumentar a velocidade de rotação do forno é a diminuição da volatilização do SO₂ (o que de facto aconteceu), isto porque ao aumentar a velocidade, diminui a taxa de enchimento do forno e como tal a chama do queimador está mais afastada do material, o que consequentemente provoca menor libertação de SO₂.

O teor em Na₂O e em Cl⁻ apenas é controlado na farinha do ciclone 4 uma vez que é de extremo interesse operacional devido ao ciclo de voláteis (Capítulo 6).

8.2.3. Análise química do clínquer

Não é expectável que a alteração feita ao processo (incremento da velocidade do forno) induza quaisquer alterações em etapas anteriores ao forno, uma vez que esta alteração deve reflectir-se no processo a partir do momento em que a farinha entra no forno. Contudo é importante saber o que aconteceu até então, e daí a necessidade de conhecer o processo desde as matérias-primas. Em relação aos componentes maioritários e minoritários do clínquer não existem diferenças a evidenciar (Gráfico 4).

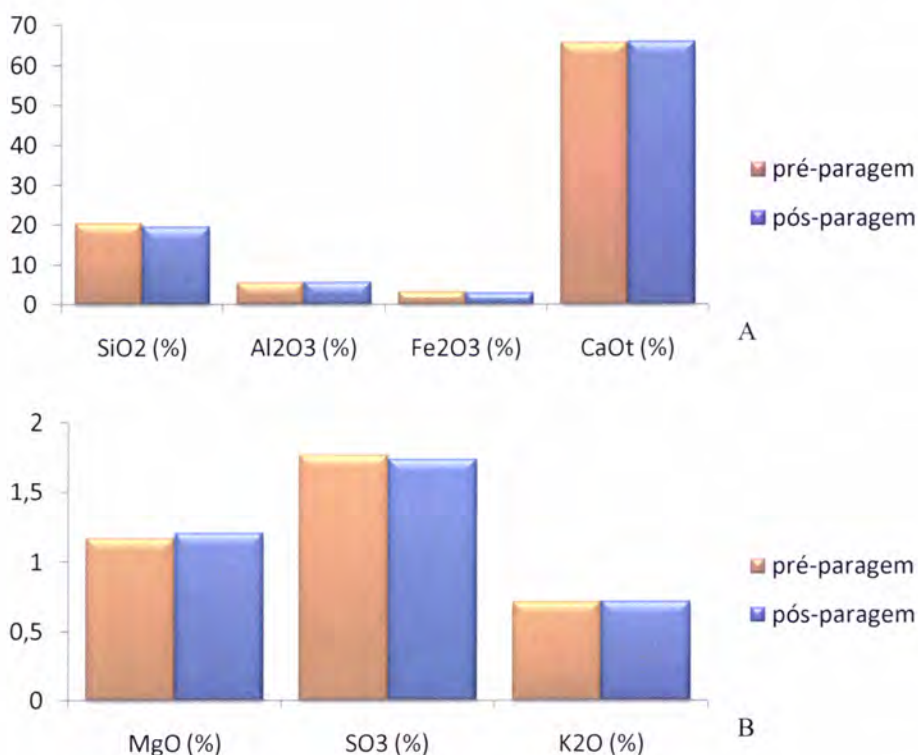


Gráfico 4: Clínquer: representação dos componentes maioritários (A) e minoritários (B) respectivos aos dois períodos de monitorização.

No que respeita à cal livre (CaO_{IV}) existe uma notória diferença em relação à média de ambos os ciclos (Gráfico 5). No período de pré-paragem o valor médio era de 2,63% em contraste com 1,82% relativos ao período de pós-paragem. A CaO_{IV} é responsável pela expansibilidade e como tal uma diminuição deste parâmetro evidencia melhoria na qualidade do clínquer, melhoria na cozedura, clínquer menos poeirento e conseqüentemente um melhor aproveitamento energético. Aquando da preparação das amostras foi notória a diferença entre o clínquer de ambos os ciclos. Antes da alteração ao processo o clínquer era bastante pulverulento e “desfazia-se” facilmente e após alteração tornou-se num clínquer visivelmente melhor formado, mais consistente e melhor granulado (Figura 14). A análise deste parâmetro é um primeiro indicador do sucesso da alteração da velocidade do forno.

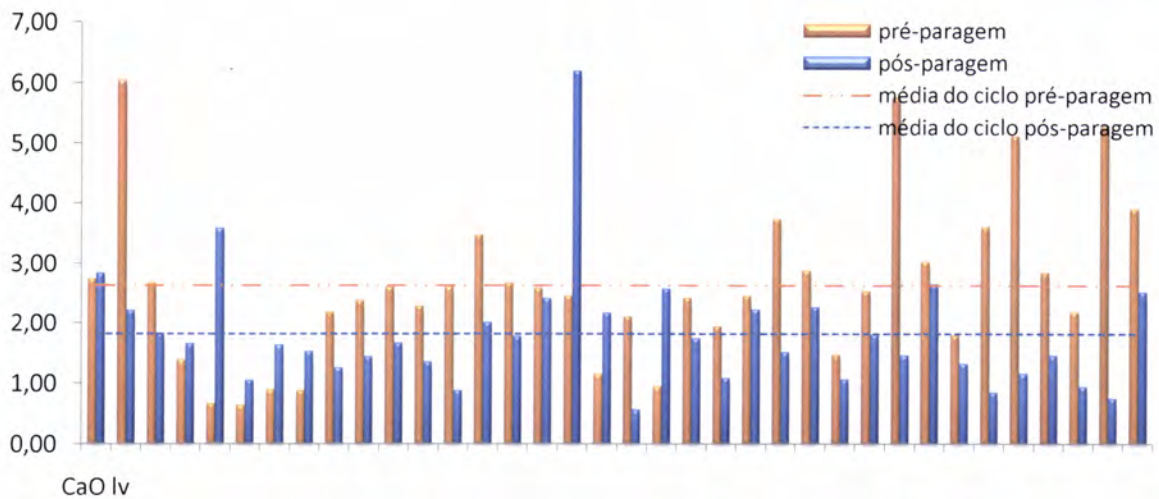


Gráfico 5: Evolução da cal livre nos períodos de pré-paragem e pós-paragem e médias dos respectivos ciclos.



A

B

Figura 14: Aspecto do clínquer no período pré-paragem (A) e no período pós-paragem (B).

Relativamente às fases do clínquer, existe um aumento bastante significativo de C_3S do período pré-paragem para o período de pós-paragem (Gráfico 6). O aumento desta fase, sendo esta responsável pelas resistências às idades jovens, implica uma diminuição do C_2S (uma vez que o C_3S resulta da combinação do C_2S e do CaO), uma melhor eficiência da moagem e consequentemente um menor consumo energético da moagem.

Não era de esperar que o aumento da velocidade do forno induzisse alguma alteração relativamente ao C_3A e ao C_4AF , e estas fases são praticamente constantes (Gráfico 6).

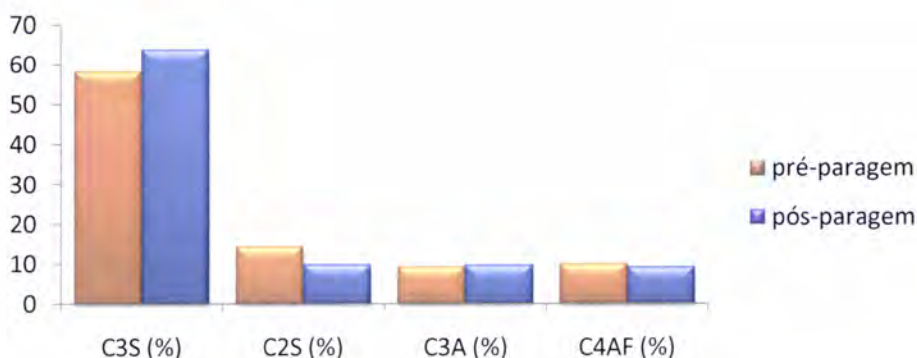


Gráfico 6: Representação das fases do clínquer respectivo a ambos os ciclos de monitorização.

A análise do clínquer implica parâmetros de controlo, como pode ver-se pela tabela seguinte. O pretendido é que os valores obtidos se aproximem tanto quanto possível do valor objectivo, definido pela fábrica. Contudo, e tendo em consideração que estes valores ainda não foram revistos após a alteração ao processo, estes parâmetros objectivos não são representativos.

Tabela 4: Limites de controlo relativos à análise química do clínquer.

(%)	CaO _v	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
LSC	2,1	5	2,6	66,0	19,0	11,5	11,5
Objectivo	1,5	-	2,0	60,0	13,0	10,0	10,0
LIC	0,9	-	1,4	54,0	7,0	8,5	8,5

8.3. Módulos químicos

No anexo V podem analisar-se pormenorizadamente as tabelas relativas aos módulos químicos da farinha de alimentação ao forno, da farinha do ciclone 4 e do clínquer em ambos os ciclos de monitorização.

Na farinha de alimentação ao forno a saturação em cal, LSF, (equação 8) está estritamente relacionada com a proporção de cal livre, C₃S e C₂S. Mantendo a cal livre constante, a proporção de C₃S aumenta e a de C₂S diminui com o aumento do LSF. Se este aumento for

acentuado será seguido por um aumento da temperatura de clinquerização, o que conduz a um aumento do consumo energético. (Martins, 1996; Alexandre, 2004). O gráfico seguinte evidencia a variação do LSF do período de pré-paragem para o período de pós-paragem. Apesar de o LSF aumentar no período de pós-paragem, esse aumento não é significativo e como confirmam os resultados a cal livre diminui bastante no clínquer relativo ao período pós-paragem. É bastante importante perceber que esta análise apenas é feita para a farinha de alimentação ao forno, sendo que o ciclone 4 é apenas um ponto de controlo onde não são dedutíveis conclusões e o clínquer é uma consequência do que acontece na farinha de alimentação ao forno.

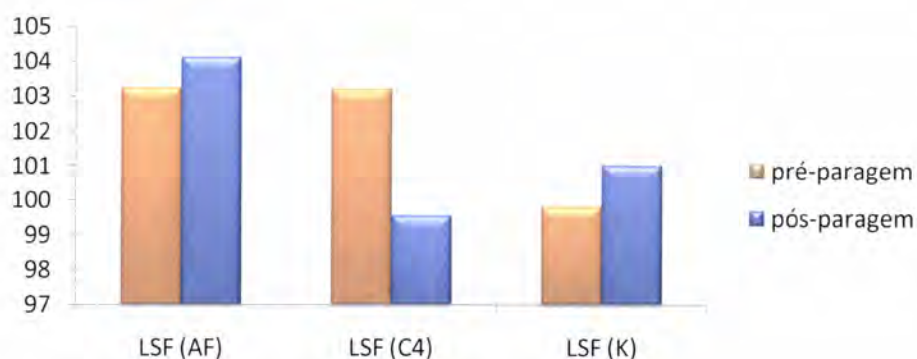


Gráfico 7: Representação do LSF respectivo a ambos os ciclos de monitorização.

O módulo silicioso, MS, (equação 6) está intimamente relacionado com o desenvolvimento da fase líquida. O modo como os compostos siliciosos estão presentes nas matérias-primas é muito importante para o processo de sinterização. À medida que o MS aumenta, aumenta também a temperatura de clinquerização, o que por conseguinte incrementa o consumo energético (Martins, 1996; Alexandre, 2004). O gráfico seguinte mostra a variação do MS do período de pré-paragem para o período de pós-paragem. Também neste caso a análise só é feita ao nível da farinha de alimentação ao forno, e como se pode ver o MS é constante.

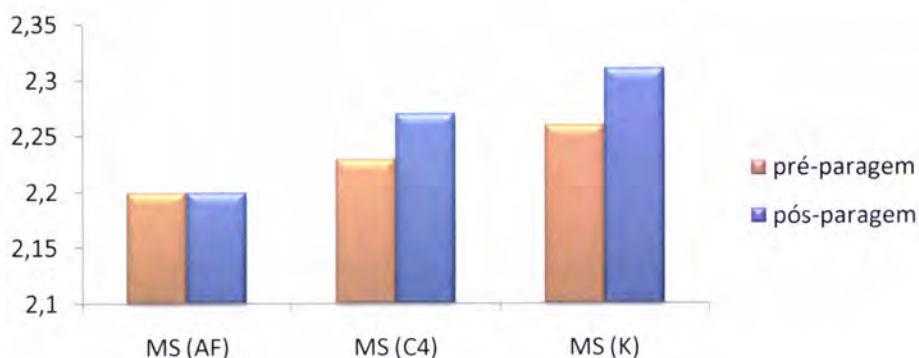


Gráfico 8: Representação do MS respectivo a ambos os ciclos de monitorização.

Por sua vez, o módulo aluminoso, MA, (equação 7) controla a composição e a natureza da fase líquida, exercendo influência na temperatura de cozedura das matérias-primas. Quando MA aumenta (>2,5) a viscosidade da fase líquida aumenta e a difusão de materiais torna-se mais difícil. Assim, à temperatura de cozedura, o grau de combinação do CaO diminui (Martins, 1996; Alexandre, 2004). O gráfico seguinte mostra a variação do MA do período de pré-paragem para o período de pós-paragem. A análise deste parâmetro, também feita só ao nível da farinha de alimentação ao forno, evidencia alterações, mas ainda assim abaixo dos 2,5, e assim sendo sem grande relevância.

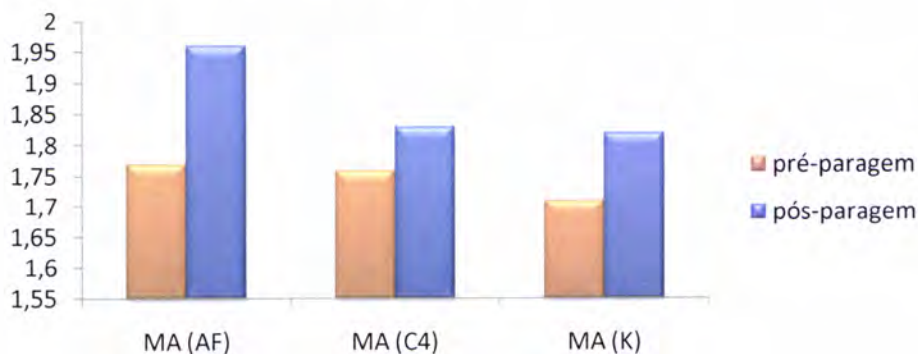


Gráfico 9: Representação do MA respectivo a ambos os ciclos de monitorização.

8.4. Indicadores de Benchmarking

O KFUI permite analisar a uniformidade da farinha de alimentação ao forno. O valor óptimo é inferior a 14 e quanto menor mais representativo de uma melhor uniformidade. Pela análise dos resultados não existe uma melhor uniformidade da farinha de alimentação ao forno no período de pós-paragem (aumentou de 13% para 27%). No dia 5 de Julho a recolha da amostra pontual foi feita numa altura de maior instabilidade do processo e caso esse dia fosse ignorado o KFUI seria de 5%, o que evidenciaria uma melhoria significativa da uniformidade da farinha.

O FLUI permite analisar a uniformidade do clínquer através da cal livre. O valor óptimo é inferior a 1 e quanto menor mais representativo de uma melhor uniformidade. Existe uma melhoria no período de pós-paragem (baixou de 0,75% para 0,43%), após alteração da velocidade do forno, como seria expectável, uma vez que a alteração ao processo induziu uma maior velocidade de rotação do forno, menor grau de enchimento, maior controlo das condições de cozedura e consequentemente melhor controlo da cal livre, cujo valor médio se aproxima do objectivo (mais baixo) com maior regularidade.

O KSUI permite analisar a volatilização do enxofre no forno e o valor óptimo é inferior a 10. Um valor mais baixo representa uma melhoria no processo, com maior controlo da temperatura da zona de cozedura. O teor de SO_3 no clínquer correspondente ao período pós-paragem é inferior (1,77% no período pré-paragem vs 1,74% no período pós-paragem) e consequentemente o KSUI deste mesmo período é inferior e representativo de uma melhoria no processo (2,83% no período pré-paragem vs 1,47% no período pós-paragem).

O CUI permite analisar a uniformidade do clínquer produzido e o valor óptimo deve encontrar-se entre 12 e 16. Os resultados não mostram uma melhoria (aumentou de 14,45%

para 51,91%). À semelhança do KFUI, no dia 5 e no dia 6 a recolha da amostra pontual foi feita numa altura de maior instabilidade do processo e não é possível concluir por isso que os resultados são piores.

Tabela 5: Índices de Benchmarking correspondentes a ambos os períodos de monitorização.

		KFUI (%)	FLUI (%)	KSUI (%)	CUI (%)
Pré-paragem	08-05-2008	¹³			
	09-05-2008	26	0,08	2,42	0,02
	10-05-2008	9	1,50	2,33	18,77
	11-05-2008	4	0,67	2,40	24,56
	Média	13	0,75	2,83	14,45
Pós-paragem	04-07-2008	0	0,51	1,46	20,18
	05-07-2008	76	0,00	1,49	79,16
	06-07-2008	5	0,77	1,47	56,40
	Média	27	0,43	1,47	51,91

8.5. Parâmetros do processo

A combustão no forno deve realizar-se em atmosfera oxidante. Valores baixos de oxigénio (O_2) na entrada do forno conduzem a uma atmosfera redutora, o que contribui para o aumento da volatilização no forno, originando ciclos internos de enxofre e cloro, que aumentam a probabilidade de “agarramentos”, tanto na câmara de fumos como nos ciclones inferiores, e a formação de anéis no forno, podendo levar à paragem da marcha do forno. O O_2 na câmara de fumos deve ser entre 2 e 4% e à saída do pré-aquecedor deve estar compreendido entre 3 e 6% (sendo 3,6% o valor óptimo) (Leitão, 2003).

Em relação ao monóxido de carbono (CO), este resulta da queima incompleta do combustível, devido à ausência de oxigénio, ou do tempo de permanência do combustível insuficiente na zona de queima. O seu valor deverá ser tão baixo quanto possível, quer na câmara de fumos, quer à saída do pré-aquecedor, para que se evite a formação de “incozidos” no clínquer e a

¹³ A amostra pontual diária não foi recolhida.

diminuição da eficiência da permuta térmica, uma vez que provoca uma chama alongada e incrementa o consumo energético do forno (Leitão, 2003).

O gráfico 10 ilustra o melhoramento do processo no que respeita a estes parâmetros. A percentagem de oxigénio na câmara de fumos subiu de 1,42% para 2% e à saída do pré-aquecedor desceu de 4,58% para 3,91% (aproximando-se do valor óptimo). O monóxido de carbono mantém-se praticamente constante e bastante baixo em ambos os ciclos. Estes dados podem analisar-se no anexo VI.

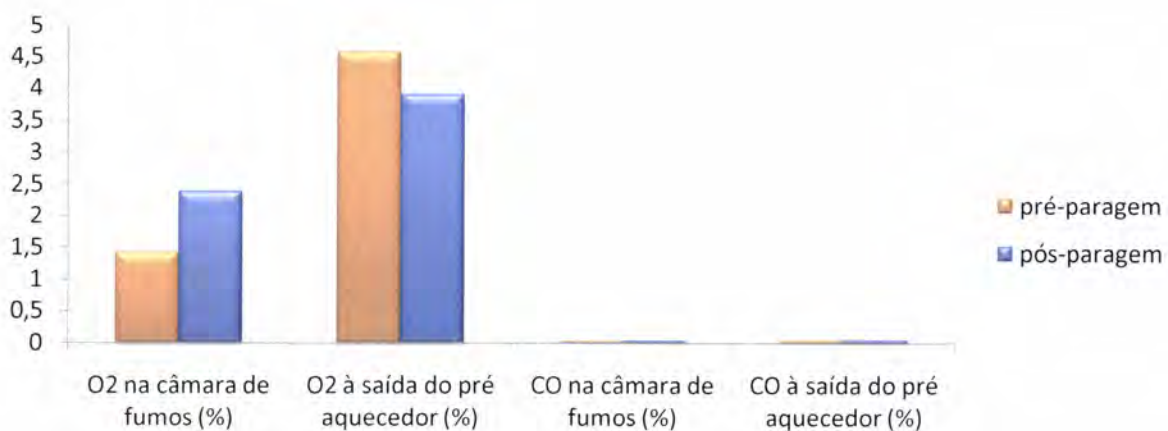


Gráfico 10: Representação de parâmetros do processo respectivos a ambos os ciclos de monitorização.

As chamas variam consideravelmente de comprimento, forma, cor, direcção e ponto de ignição. Estas características “aprendem-se” a reconhecer e controlar com a experiência. Em traços gerais, a chama deve ser tão curta e quente quanto possível, sem influenciar negativamente a qualidade do clínquer, a formação de crosta, a beija e o tempo de vida dos refractários. Uma chama “pobre” pode provocar uma combustão incompleta, com a formação de atmosfera redutora (Leitão, 2003).

A temperatura teórica de uma chama de um combustível é definida como a temperatura que se atingiria se o combustível fosse queimado com a quantidade estequiométrica de oxigénio e se a combustão fosse completa, sem perdas de calor para o exterior. Na prática, a temperatura

teórica da chama nunca é alcançada, uma vez que a chama irradia ainda algum calor antes de a combustão estar completa. Assim sendo, a temperatura real de trabalho é inferior à temperatura teórica. A temperatura real da chama deve estar compreendida entre 1200 e 1400°C, sendo que quanto mais baixo (ainda que dentro deste intervalo de valores) menor o consumo térmico do forno (Leitão, 2003).

O ar secundário proveniente da zona inicial do arrefecedor, é introduzido no forno, contribuindo para melhorar a eficiência térmica e diminuindo a quantidade de combustível a utilizar. A temperatura do ar secundário define o comportamento da ignição da chama e posteriormente a sua temperatura. Uma temperatura insuficiente do ar secundário deverá ser compensada com o combustível, o que se traduz num aumento da quantidade de gases de combustão e um conseqüente aumento do perfil de temperaturas. A temperatura do ar secundário deve estar entre os 900 e os 1000°C. Na prática são aceites valores até aos 1300°C, uma vez que o ar secundário e o ar terciário estão relacionados com um equilíbrio dos ventiladores de tiragem e basta que exista algum factor adverso para que este equilíbrio seja parcialmente alterado (Leitão, 2003).

O ar terciário é retirado da zona localizada entre o primeiro e segundo nível de grelhas e segue, através de uma conduta própria, para o pré-calcinador, onde é dividido em duas correntes. A temperatura do ar terciário deve estar compreendida entre 700 e 900°C (Leitão, 2003).

O gráfico 11 ilustra a comparação entre os períodos de pré-paragem e pós-paragem no que respeita à temperatura da chama, do ar secundário e do ar terciário (Anexo VI). A temperatura da chama passou de 1323°C para 1299°C, o que evidencia uma menor volatilização e um melhor aproveitamento térmico no período de pós-paragem. A temperatura do ar secundário passou de 902°C (muito baixo) para 1144°C (um pouco alto) e a temperatura do ar terciário

permaneceu bastante baixa e praticamente constante, passou de 612°C para 615°C. O facto de ambas as temperaturas (ar secundário e ar terciário) não corresponderem exactamente aos objectivos deve-se a um desequilíbrio ao nível de ventiladores de tiragem de ar, secundário e terciário.

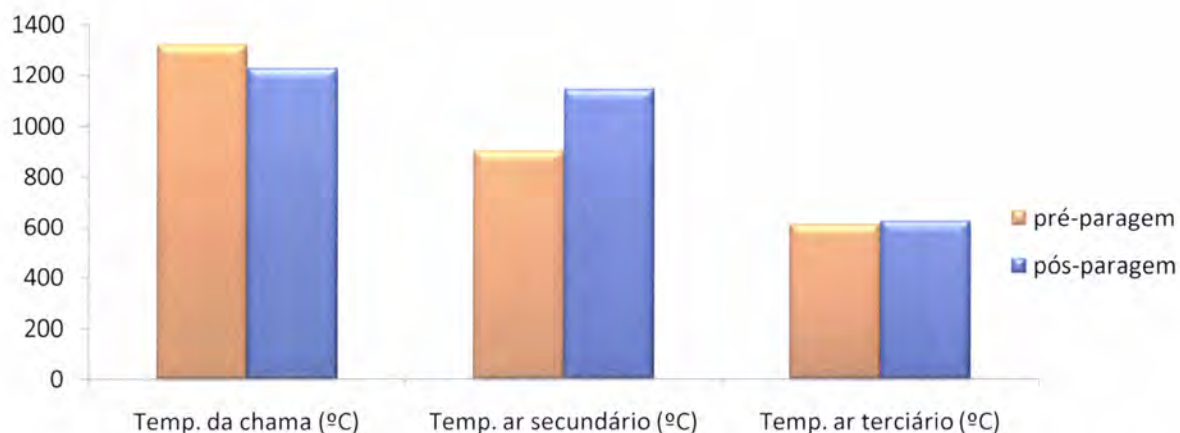


Gráfico 11: Representação de parâmetros do processo respectivos a ambos os ciclos de monitorização.

Tal como se pode analisar no anexo VI, no período de pré-paragem o tempo de residência do clínquer na zona de cozedura (ZC) é de 70min., com um enchimento de 18% para uma velocidade de rotação de 1,98rpm e uma alimentação ao forno de 113t/h. No período de pós-paragem o tempo de residência do clínquer na zona de cozedura é de 47min., com um enchimento de 14% para uma velocidade de rotação de 2,94rpm e uma alimentação ao forno de 130t/h (ver gráfico 12).

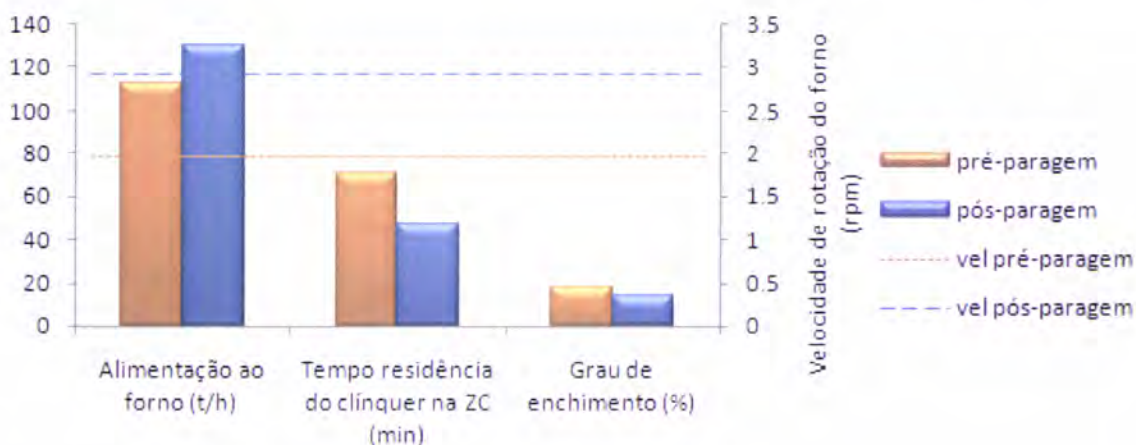


Gráfico 12: Representação de parâmetros do processo respectivos a ambos os ciclos de monitorização.

A alteração no processo consistiu em aumentar significativamente a velocidade de rotação do forno, como se ilustra no gráfico 12. Como consequência deste aumento era expectável que a taxa de enchimento do forno diminui-se significativamente. O valor óptimo do grau de enchimento é entre 11 e 13%, contudo, e apesar da diminuição entre ambos os ciclos, obteve-se um grau de enchimento de 14%. Não foi possível trabalhar abaixo deste valor, uma vez que os operadores de comando ainda não estão sensibilizados para trabalhar a velocidades de rotação superiores. Porém, a 14% evita-se danificar o refractário e obtém-se uma boa cozedura e uma melhoria da qualidade do clínquer. Esta melhoria está relacionada com a superfície de matéria exposta à chama, porque ao trabalhar a taxas superiores a chama está em demasiado contacto com a matéria e origina um sobreaquecimento à superfície e “incozidos” no extremo oposto (o que incrementa o teor da cal livre e provoca a indesejada expansibilidade do cimento). Por sua vez, o tempo de permanência do clínquer na zona de cozedura também é um parâmetro muito importante, pois se for superior a 60min. conduz a cristais demasiado grandes e difíceis de moer, o que implica um gasto energético bastante superior na moagem.

A permuta de calor no forno é influenciada pela forma da chama, que depende, entre outros factores, do caudal e características do combustível. Com a finalidade de obter uma chama

constante, o combustível deve entrar no forno com um caudal de alimentação constante. Em relação à alimentação de combustível, cerca de 60% do combustível é utilizado no pré-calcinador e os restantes 40% no forno (Leitão, 2003).

Após uma análise tão positiva relativamente ao período de pós-paragem e à alteração ao processo será de prever que o consumo térmico do forno também tenha melhorado, ou seja, tenha diminuído. Este passou de 876,5 para 826,82kcal/kg (de clínquer), o que representa uma diminuição de 5,8%, valor bastante significativo considerando que 30% dos custos totais correspondem aos combustíveis.

A produção do forno aumentou no período de pós-paragem, passando de 55,73 t/h para 77,00 t/h, como se pode ver na tabela 6.

Tabela 6: Produção de clínquer em ambos os períodos de monitorização.

		Produção de clínquer (t/h)
Pré-paragem	08-05-2008	29,07
	09-05-2008	70,25
	10-05-2008	72,33
	11-05-2008	51,27
	Média	55,73
Pós-paragem	04-07-2008	77,46
	05-07-2008	76,83
	06-07-2008	76,71
	Média	77,00

8.6. Energia

Um dos objectivos pretendidos aquando da alteração ao processo era uma diminuição energética do fabrico de cimento. Esta diminuição seria visível ao nível dos moinhos de cimento, contudo o tempo de monitorização não permite analisar o processo a este nível, uma vez que parte dos valores de energia analisados ainda correspondem a cimentos feitos com

clínquer de stock relativo a um período anterior ao da alteração ao processo. Isto pode ser confirmado com recurso à análise do anexo VII.

8.7. Moagens de cimento

Relativamente às moagens de cimento o importante, após a alteração induzida ao processo, é que se consiga produzir um cimento dentro das especificações mas com uma menor incorporação de clínquer. A tabela 7 evidencia que, quer em relação ao CEM II/A-L 42,5R, quer em relação ao CEM II/B-L 32,5N, se conseguiu reduzir a incorporação de clínquer. Com um clínquer de melhor qualidade produz-se o cimento pretendido utilizando menor quantidade de clínquer. Os meses de Fevereiro, Março e Abril correspondem ao período de pré-paragem e os meses de Junho, Julho e Agosto pertencem ao período de pós-paragem. O mês de Junho não é representativo uma vez que apenas se utilizou clínquer do stock, produzido ainda no período pré-paragem. Porém pela análise do mês de Julho e Agosto pode afirmar-se que a incorporação de clínquer teve uma diminuição na ordem dos 4 e 9% relativamente ao CEM II/A-L 42,5R e ao CEM II/B-L 32,5N, respectivamente.

Tabela 7: Incorporação de clínquer em ambos os tipos de cimento produzidos na Cimpor – Centro de Produção de Loulé.

		Incorporação de clínquer (%)	
		CEM II/A-L 42,5R	CEM II/B-L 32,5N
Pré-paragem	Fevereiro 2008	80,32	72,32
	Março 2008	79,38	71,43
	Abril 2008	79,09	69,92
Pós-paragem	Junho 2008	82,58	74,73
	Julho 2008	76,74	65,64
	Agosto 2008	76,48	64,19

Estas variações estiveram estritamente relacionadas com a alteração da qualidade do clínquer e não com a natureza das adições de calcário e gesso às moagens de cimento, pois estas são

bastante homogéneas, como se pode verificar nas análises químicas apresentadas no anexo IX.

9. Síntese e conclusões

A indústria cimenteira tem um papel importantíssimo no desenvolvimento mundial. O fabrico de cimento é um processo complexo, que engloba 4 etapas principais, nomeadamente a preparação do cru, cozedura e arrefecimento, adições e moagem e por último, ensilagem e expedição.

A principal etapa é a cozedura e arrefecimento, que é bastante dispendiosa do ponto de vista energético. O objectivo desta etapa é atingir o equilíbrio das fases do clínquer na temperatura de clinquerização o mais rápido possível e com o menor consumo térmico em todas as fases. Isto pode conseguir-se com um perfil de temperaturas correcto ao longo do forno (doseamento de combustível), tempo de residência adequado (velocidade do forno) e rápido arrefecimento à saída do forno. A optimização do consumo energético está intrinsecamente relacionada com o planeamento e condução do processo.

O presente trabalho teve como objectivo estudar a reactividade do clínquer do Centro de Produção de Loulé após uma alteração significativa ao processo, a alteração do redutor do motor do forno. Para tal foi necessário caracterizar três zonas específicas do processo: a farinha de alimentação ao forno, a farinha do ciclone 4 e o clínquer. Esta análise dividiu-se em dois períodos temporais distintos, o período pré-paragem (entre 8 e 11 de Maio), anterior à alteração ao processo e o período de pós-paragem (entre 4 e 6 de Julho), posterior à alteração ao processo.

Este estudo englobou três objectivos: melhorar a qualidade do clínquer, reduzir o consumo térmico do forno e reduzir o consumo energético dos moinhos de cimento.

De forma a poder efectuar-se um estudo comparativo antes e após a paragem do forno, foi necessário confirmar que não houve alterações nas matérias utilizadas à entrada do forno.



Para tal, realizaram-se análises químicas das matérias-primas, farinha de alimentação ao forno e do ciclone 4, tendo-se verificado uma uniformidade entre os valores respectivos a ambos os períodos de monitorização.

A análise do clínquer foi particularmente interessante, tendo sido bastante proeminente a diminuição da cal livre (responsável pela indesejada expansibilidade), que diminuiu de 2,63% para 1,82%. Esta diminuição implicou uma evidente melhoria na qualidade do clínquer, melhoria na cozedura e conseqüentemente um clínquer menos poeirento, resultando num melhor aproveitamento energético.

Após a alteração do processo o C_3S aumentou de 58,38% para 63,92%. O aumento desta fase do clínquer (responsável pelas resistências às idades jovens) indica uma melhor eficiência da moagem e, conseqüentemente, um menor consumo energético da mesma.

Os indicadores Benchmarking representam a qualidade do produto formado, nomeadamente a sua uniformidade e evidenciam a regularidade química da farinha produzida e do clínquer obtido, o que indica igualmente a estabilidade e controlo da operação de cozedura. O FLUI (analisa a uniformidade do clínquer através da cal livre) baixou de 0,75% para 0,43% após alteração da velocidade do forno, como seria expectável, uma vez que a alteração ao processo induziu uma maior velocidade de rotação do forno, menor grau de enchimento, maior controlo das condições de cozedura e conseqüentemente melhor controlo da cal livre. O KSUI (analisa a volatilização do enxofre no forno) diminuiu de 2,83% para 1,47% e igualmente evidencia uma melhoria no processo.


A alteração da velocidade máxima de rotação de 2rpm para 3,5 rpm (com o novo redutor) permitiu reduzir a taxa de enchimento do forno de 18% para 14%, e tempo de residência do clínquer na zona de cozedura de 70min. para 47min., o que induziu uma melhoria na


qualidade do clínquer e permitiu reduzir o consumo térmico do forno, permitindo alcançar assim dois dos três objectivos pretendidos.


Seria expectável observar igualmente uma redução do consumo energético dos moinhos de cimento, uma vez que o clínquer estava melhor preparado (com mais qualidade). Contudo, e apesar de este também constituir um dos objectivos pretendidos, não é possível tirar conclusões a este nível, uma vez que parte dos valores de energia analisados ainda correspondem a cimentos feitos com clínquer de stock relativo a um período anterior ao da alteração ao processo.

Em suma, pode afirmar-se que a alteração, que consistiu em instalar um novo redutor no motor do forno, foi um sucesso em termos de resultados, uma vez que introduziu melhorias significativas ao nível do processo de produção de cimento e produz-se actualmente em Loulé um cimento de melhor qualidade.


Referências Bibliográficas


 CimporTec – Engenharia e Serviços Técnicos S.A. (2001); “Produtos em Curso de Processo”; Relatório interno.

 CimporTec – Engenharia e Serviços Técnicos S.A. (2003); “Ciclo de Voláteis”; Relatório interno.


 CimporTec – Engenharia e Serviços Técnicos S.A. (2004); “Processo de Cozedura”; Relatório interno.


 Coutinho, Joana de Sousa (2006); “Materiais de Construção 2”; Universidade do Porto.


 Leitão, Francisco (2003); “Combustíveis e Combustão na Indústria do Cimento”; Manual interno.

 Lopes, Mário; Leitão, Francisco (sem data); “Introdução ao Processo de Fabrico”; Manual interno.

 Martins, Teresa; Alexandre, Carla (2004); “Química do Cimento”.

 Okamura, Fabiano; Cavalheiro, Éder; Nóbrega, Joaquim (2004); “Experimentos Simples Usando Fotometria de Chama”; Química Nova, V27, nº.5, 832-836.

 Sofia, Raquel; Paulo, Nascimento (2006); “Caracterização de Argamassas Industriais”, Universidade de Aveiro.

 The Energy Cement Conservation – ECC (1994); “Cement Industry – Handy Manual”; Japan.

Sites de Internet

 <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cimento>

Anexos

Índice

Anexo I	3
Anexo II	5
Anexo III	9
Anexo IV	11
Anexo V	25
Anexo VI	31
Anexo VII	37
Anexo VIII	39
Anexo IX	43



Anexo I

Produtos da família do cimento

Tabela I.1: Os 27 produtos da família de cimentos correntes (NP EN 197-1, 2001) (Coutinho, 2006).

Notação dos 27 produtos (tipos de cimento corrente)		Composição (percentagem em massa)										Constituintes adicionais minoritários
		Constituintes principais										
		Clinker (K)	Escória de alto forno (S)	Silica de fumo (D)	Polzolana		Cinza volante		Xisto cozido (T)	Calcário		
Natural (P)	Natural calcinada (Q)				Siliciosos (V)	Calcária (W)	L	LL				
Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de polzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
Cimento Portland composto	CEM II/A-M	80-94	6-20									0-5
	CEM II/B-M	65-79	21-35									0-5
Cimento de alto forno	CEM III/A	35-64	36-55	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimento polzolânico	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5
	CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5
Cimento composto	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5
	CEM V/B	20-38	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5



Anexo II

Equipamento de laboratório



Figura II.1: Moinho de anéis, utilizado para moer matérias que necessitam uma granulometria específica para a realização de certos ensaios.



Figura II.2: Peroladora, utilizada com a finalidade de fazer pérolas a utilizar na análise química.



Figura II.3: Espectrómetro de raios X S4 Pioneer, utilizado nas análises químicas.

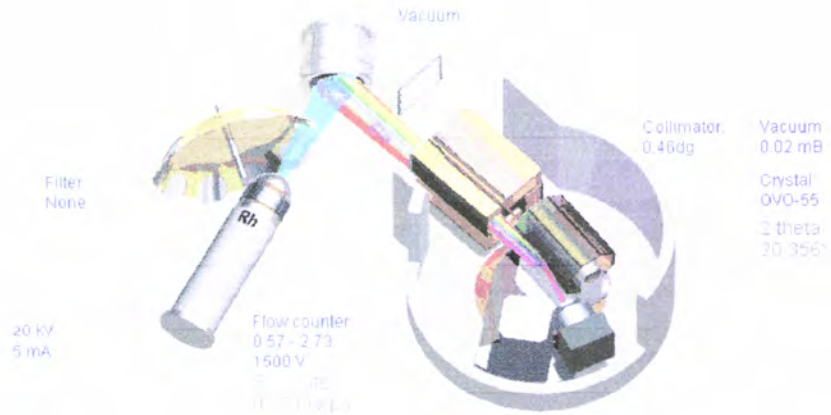


Figura II.4: Esquema de funcionamento do espectrômetro de fluorescência de raios X.



Figura II.5: Fotômetro de chama, utilizado na determinação do sódio.

Anexo III

Formação e análises químicas das pilhas

Tabela IV.2: Análise química relativa à farinha de alimentação ao forno, correspondente ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO ₁ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)
04-07-2008	0	35,12	13,14	4,00	2,07	43,53	0,82	0,20	0,49
	2	34,99	13,08	4,02	2,03	43,45	0,82	0,20	0,48
	4	34,95	13,09	4,03	2,05	43,46	0,81	0,19	0,48
	6	35,13	13,20	3,98	2,05	43,33	0,81	0,18	0,47
	8	35,23	13,29	3,98	2,00	43,64	0,87	0,20	0,48
	10	35,00	12,94	4,00	1,96	43,06	0,78	0,20	0,50
	12	34,84	12,91	3,97	2,01	43,26	0,79	0,19	0,49
	14	34,88	12,93	3,98	2,02	43,42	0,77	0,18	0,49
	16	34,90	13,35	4,00	2,07	43,80	0,85	0,18	0,48
	18	34,92	13,13	4,02	2,01	43,52	0,80	0,17	0,48
	20	35,01	12,82	3,95	1,97	43,19	0,77	0,19	0,47
	22	34,87	13,14	3,97	2,04	43,83	0,85	0,20	0,50
Amostra média diária		35,08	12,94	3,91	2,03	43,28	0,79	0,18	0,47
Média		34,99	13,08	3,99	2,02	43,48	0,81	0,19	0,48
05-07-2008	0	34,90	12,93	3,94	2,01	43,49	0,77	0,17	0,47
	2	34,87	12,82	3,90	1,96	43,50	0,80	0,18	0,47
	4	34,76	13,08	4,01	2,03	43,90	0,85	0,19	0,48
	6	35,15	13,05	3,98	2,05	44,05	0,87	0,18	0,47
	8	35,16	12,87	3,90	1,99	43,99	0,80	0,15	0,47
	10	35,02	12,87	4,01	1,96	43,82	0,87	0,19	0,48
	12	35,12	12,71	3,92	1,99	43,44	0,76	0,17	0,47
	14	34,94	12,43	3,84	1,87	43,70	0,78	0,18	0,46
16	35,01	12,47	3,85	1,90	43,77	0,79	0,17	0,47	

Tabela IV.2 (continuação): Análise química relativa à farinha de alimentação ao forno, correspondente ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO ₁ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)
05-07-2008	18	35,22	12,64	3,90	1,93	43,34	0,78	0,18	0,47
	20	35,37	12,54	3,90	1,93	43,57	0,79	0,18	0,47
	22	34,99	12,98	3,84	2,01	43,39	0,75	0,18	0,50
	Amostra média diária	35,12	12,70	3,88	2,17	43,61	0,81	0,17	0,47
	Média	35,04	12,78	3,92	1,97	43,66	0,80	0,18	0,47
	0	35,07	12,93	3,81	1,96	43,11	0,74	0,16	0,48
06-07-2008	2	34,92	12,99	3,84	2,01	43,44	0,76	0,17	0,51
	4	35,03	13,14	3,89	1,99	43,35	0,78	0,16	0,49
	6	35,21	12,81	3,78	1,98	43,90	0,80	0,16	0,48
	8	35,25	12,86	3,70	1,96	43,89	0,79	0,16	0,47
	10	35,15	12,67	3,77	1,90	43,59	0,79	0,17	0,48
	12	35,22	12,78	3,84	1,92	43,75	0,79	0,16	0,48
	14	34,59	13,41	3,67	2,01	43,48	0,78	0,14	0,49
	16	34,91	13,03	3,65	1,98	43,69	0,78	0,16	0,49
	18	34,91	12,97	3,73	1,99	43,97	0,77	0,14	0,49
	20	35,10	12,93	3,69	2,00	43,90	0,77	0,13	0,48
	22	35,29	12,73	3,62	1,94	43,91	0,77	0,15	0,47
	Amostra média diária	35,02	12,85	3,72	1,95	43,51	0,78	0,16	0,48
Média	35,05	12,94	3,75	1,97	43,67	0,78	0,16	0,48	
Média (do ciclo)	35,03	12,93	3,78	1,99	43,60	0,80	0,17	0,48	
Desvio padrão	0,16	0,23	0,12	0,05	0,25	0,03	0,02	0,01	

Tabela IV.3: Análise química relativa à farinha do ciclone 4, correspondente ao período entre 08/05/2008 e 11/05/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _i (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Cl ⁻ (%)
08-05-2008	18	0,85	17,51	4,98	2,95	57,67	0,96	11,54	0,74	0,17	0,110
	20	7,87	16,04	4,73	2,62	55,52	0,92	9,89	0,69	0,16	0,126
	22	1,11	17,14	4,99	2,85	57,49	0,96	12,93	0,82	0,16	0,142
	Amostra média diária	3,54	16,62	4,83	2,81	56,33	0,94	11,49	0,74	0,16	0,129
	Média	3,28	16,90	4,90	2,81	56,89	0,95	11,45	0,75	0,16	0,126
09-05-2008	0	0,83	17,36	4,90	2,83	57,71	0,96	11,43	0,87	0,18	0,134
	2	3,92	18,44	5,14	3,00	59,91	0,98	6,06	0,85	0,18	0,126
	4	2,16	18,15	5,06	2,88	57,40	0,97	11,72	0,89	0,17	0,126
	6	1,55	18,05	5,10	2,94	58,79	0,99	10,54	0,85	0,18	0,126
	8	1,84	18,39	5,10	2,98	57,91	0,98	10,26	0,88	0,19	0,130
	10	9,34	16,73	4,89	2,70	57,60	0,94	5,85	0,76	0,17	0,134
	12	8,89	16,64	4,87	2,72	57,41	0,95	8,60	0,79	0,18	0,150
	14	4,73	16,92	5,00	2,77	58,56	0,95	7,23	0,84	0,17	0,166
	16	2,38	17,56	5,09	2,84	58,65	0,97	9,31	0,79	0,17	0,144
	18	5,98	17,49	4,98	2,81	58,59	0,96	5,76	0,78	0,18	0,122
20	3,93	16,83	4,92	2,67	59,07	0,98	8,58	0,77	0,17	0,126	
22	1,72	17,15	5,01	2,74	60,26	1,01	11,07	0,76	0,18	0,130	
	Amostra média diária	3,81	17,34	4,91	2,81	57,92	0,96	8,65	0,82	0,17	0,137
	Média	3,94	17,48	5,01	2,82	58,49	0,97	8,87	0,82	0,18	0,135
10-05-2008	0	1,94	17,91	5,01	3,01	59,05	1,02	9,26	0,85	0,18	0,136
	2	5,47	17,90	5,05	2,94	58,52	0,98	6,94	0,81	0,18	0,142
	4	7,38	17,86	5,02	2,90	58,46	0,96	5,73	0,85	0,18	0,146
	6	1,73	19,18	5,16	3,14	57,62	1,04	10,16	0,89	0,18	0,150
	8	3,12	19,51	5,14	3,21	57,40	1,04	8,13	0,85	0,18	0,148
	10	4,48	17,15	4,98	2,87	58,51	1,00	5,73	0,80	0,17	0,146

Tabela IV.3 (continuação): Análise química relativa à farinha do ciclone 4, correspondente ao período entre 08/05/2008 e 11/05/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _i (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Cl (%)
10-05-2008	12	2,96	18,14	5,21	2,98	59,05	1,03	7,69	0,88	0,18	0,166
	14	6,13	17,36	4,99	2,81	57,43	1,00	7,28	0,81	0,17	0,186
	16	8,21	16,89	4,98	2,75	57,36	0,99	6,84	0,82	0,18	0,177
	18	2,44	17,12	4,82	2,81	58,25	1,04	11,07	0,79	0,17	0,168
	20	6,14	17,36	4,97	2,88	58,61	1,02	5,99	0,84	0,18	0,142
	22	10,28	16,60	4,78	2,71	56,26	0,99	5,75	0,80	0,16	0,134
	Amostra média diária	5,11	17,63	4,95	2,88	57,47	1,00	7,45	0,83	0,18	0,150
11-05-2008	Média	5,02	17,75	5,01	2,92	58,04	1,01	7,55	0,83	0,18	0,153
	0	8,98	16,65	4,78	2,70	55,51	1,00	7,57	0,79	0,18	0,126
	2	5,74	17,38	4,90	2,84	57,93	1,03	7,28	0,79	0,17	0,132
	4	8,01	17,12	4,97	2,74	57,81	1,03	6,91	0,79	0,17	0,138
	6	7,37	17,14	4,90	2,79	56,88	1,02	6,80	0,81	0,18	0,135
	8	6,82	16,88	4,92	2,79	56,62	1,01	7,94	0,90	0,18	0,132
	10	8,75	16,75	4,85	2,70	56,13	1,01	7,11	0,77	0,18	0,127
	12	4,57	16,73	4,93	2,70	57,50	1,03	9,49	0,78	0,18	0,122
	14	3,39	17,20	4,98	2,79	58,84	1,04	9,13	0,81	0,17	0,116
	16	7,81	16,67	4,87	2,69	57,16	1,02	7,57	0,78	0,17	0,110
	Amostra média diária	7,48	16,69	4,83	2,72	56,69	1,02	7,76	0,80	0,17	0,126
Média	6,83	16,95	4,90	2,75	57,15	1,02	7,76	0,80	0,18	0,127	
Média (do ciclo)	4,97	17,39	4,97	2,83	57,87	0,99	8,37	0,81	0,18	0,14	
Desvio padrão	2,84	0,74	0,11	0,13	1,08	0,03	2,03	0,05	0,01	0,02	

Tabela IV.4: Análise química relativa à farinha do ciclone 4, correspondente ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _i (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Cl ⁻ (%)
04-07-2008	0	9,00	17,39	4,98	2,80	55,61	0,98	5,71	0,79	0,17	0,110
	2	8,48	17,28	4,99	2,73	55,54	0,97	5,50	0,80	0,19	0,132
	4	6,07	18,23	5,11	2,89	56,73	1,01	6,04	0,83	0,20	0,126
	6	5,13	18,31	5,12	2,88	57,48	1,03	6,25	0,84	0,19	0,130
	8	6,43	18,02	5,01	2,82	56,62	1,01	5,89	0,80	0,20	0,102
	10	5,70	17,92	5,14	2,82	57,40	1,02	6,32	0,84	0,19	0,122
	12	1,38	18,35	5,35	2,88	59,05	1,06	8,44	0,90	0,20	0,130
	14	2,59	18,12	5,32	2,85	59,06	1,04	7,53	0,89	0,18	0,128
	16	3,17	18,93	5,31	2,96	59,41	1,05	5,63	0,87	0,19	0,132
	18	3,59	18,38	5,35	2,89	59,51	1,07	5,67	0,89	0,19	0,142
	20	3,66	18,45	5,28	2,92	58,87	1,04	6,03	0,87	0,18	0,106
	22	3,47	18,19	5,41	2,89	59,49	1,08	6,17	0,93	0,19	0,134
Amostra média diária		7,08	17,72	5,00	2,77	56,48	1,04	6,02	0,82	0,18	0,128
Média		4,89	18,13	5,20	2,86	57,90	1,03	6,27	0,85	0,19	0,125
05-07-2008	0	2,52	19,19	5,39	2,98	60,36	1,15	5,51	0,93	0,20	0,150
	2	2,93	18,72	5,35	2,89	60,05	1,08	5,22	0,92	0,21	0,114
	4	2,93	18,54	5,33	2,91	60,10	1,08	5,51	0,89	0,19	0,138
	6	3,23	18,83	5,43	2,93	60,28	1,10	4,88	0,89	0,20	0,130
	8	3,96	18,46	5,37	2,87	59,60	1,09	5,54	0,88	0,18	0,138
	10	3,75	17,90	5,35	2,73	59,13	1,13	6,38	0,88	0,19	0,136
	12	3,51	18,78	5,42	2,95	60,09	1,12	4,89	0,92	0,21	0,162
	14	4,78	18,46	5,27	2,91	59,34	1,11	4,90	0,90	0,20	0,144
16	3,49	18,57	5,32	2,83	59,80	1,21	6,29	0,88	0,19	0,146	

Tabela IV.4 (continuação): Análise química relativa à farinha do ciclone 4, correspondente ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _t (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Cl (%)
05-07-2008	18	3,24	18,16	5,34	2,82	60,31	1,12	5,78	0,92	0,19	0,126
	20	4,95	18,28	5,45	2,77	60,47	1,25	5,49	0,91	0,20	0,134
	22	4,23	18,61	5,35	2,86	60,07	1,22	5,53	0,94	0,22	0,126
	Amostra média diária	5,66	17,86	5,10	2,79	58,14	1,06	5,23	0,87	0,21	0,142
	Média	3,63	18,54	5,36	2,87	59,97	1,14	5,49	0,91	0,20	0,137
	0	4,20	18,67	5,25	2,89	59,59	1,14	5,51	0,92	0,19	0,150
06-07-2008	2	2,34	19,17	5,30	3,04	60,36	1,09	5,48	0,98	0,21	0,142
	4	2,32	19,47	5,37	3,07	60,78	1,13	4,70	0,97	0,21	0,150
	6	2,24	19,86	5,43	3,14	61,06	1,11	4,23	0,97	0,20	0,132
	8	2,05	19,21	5,40	2,99	61,41	1,14	4,55	0,97	0,21	0,118
	10	2,04	18,32	5,20	2,79	61,36	1,11	6,93	0,98	0,21	0,130
	12	2,75	18,67	5,36	2,85	61,08	1,11	5,34	0,96	0,20	0,134
	14	3,01	19,21	5,27	2,88	59,85	1,10	5,67	0,96	0,21	0,138
	16	3,54	19,17	5,04	2,92	59,35	1,07	5,83	0,96	0,21	0,146
	18	3,37	18,91	5,09	2,91	59,77	1,08	5,29	0,98	0,20	0,152
	20	1,83	18,85	5,08	2,87	60,08	1,09	6,78	1,03	0,21	0,134
	22	4,04	17,72	5,02	2,73	60,06	1,08	6,57	1,01	0,20	0,128
	Amostra média diária	4,73	18,59	5,07	2,86	59,13	1,04	5,14	0,95	0,21	0,132
Média	2,81	18,94	5,23	2,92	60,40	1,10	5,57	0,97	0,21	0,138	
Média (do ciclo)	3,78	18,54	5,12	2,89	59,42	1,09	5,78	0,91	0,20	0,133	
Desvio padrão	1,69	0,55	0,14	0,09	1,47	0,06	0,82	0,06	0,01	0,013	

Tabela IV.5: Análise química relativa ao clínquer, correspondente ao período entre 08/05/2008 e 11/05/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	CaO _v (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _t (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	C ₃ S+C ₂ S (%)	C/S (%)
08-05-2008	18	0,12	2,74	20,47	5,78	3,39	66,36	1,14	2,00	0,59	59,75	13,62	9,58	10,32	73,36	3,24
	20	0,15	6,05	20,84	5,95	3,50	65,40	1,12	1,63	0,79	38,25	30,89	9,85	10,65	69,14	3,14
	22	0,18	2,68	20,91	5,82	3,36	66,49	1,11	1,13	0,62	56,95	16,99	9,74	10,22	73,94	3,18
09-05-2008	Amostra média diária	0,15	4,02	20,48	5,74	3,38	65,47	1,09	1,57	0,65	51,12	20,15	9,49	10,29	71,27	3,20
	Média	0,15	3,82	20,74	5,85	3,42	66,08	1,12	1,59	0,67	51,65	20,50	9,72	10,40	72,15	3,19
	0	0,22	1,39	20,80	5,82	3,30	66,39	1,15	1,06	0,58	62,72	12,32	9,84	10,04	75,04	3,19
	2	0,22	0,67	19,54	5,27	3,11	62,41	1,47	6,50	1,07	62,99	8,50	8,70	9,46	71,49	3,19
	4	0,18	0,65	20,86	5,99	3,53	66,74	1,15	0,75	0,48	65,23	10,60	9,90	10,74	75,83	3,20
	6	0,30	0,90	20,51	5,73	3,34	65,85	1,13	1,74	0,71	65,27	9,57	9,53	10,16	74,83	3,21
	8	0,26	0,88	20,51	5,68	3,32	66,18	1,18	1,92	0,73	67,05	8,22	9,43	10,10	75,27	3,23
	10	0,29	2,19	19,94	5,36	3,07	63,91	1,07	4,20	0,94	59,32	12,42	9,01	9,34	71,74	3,21
	12	0,17	2,39	20,93	5,78	3,35	67,36	1,13	0,71	0,48	61,80	13,38	9,65	10,19	75,19	3,22
	14	0,27	2,62	20,42	5,65	3,20	66,12	1,10	1,32	0,77	60,78	12,69	9,56	9,74	73,47	3,24
10-05-2008	16	0,20	2,29	20,18	5,75	3,29	65,39	1,08	2,26	0,79	60,18	12,46	9,67	10,01	72,64	3,24
	18	0,17	2,62	20,13	5,72	3,24	64,84	1,09	2,95	0,79	57,25	14,53	9,68	9,86	71,77	3,22
	20	0,12	3,49	20,11	5,70	3,28	67,09	1,16	1,47	0,71	63,10	10,06	9,56	9,98	73,15	3,34
	22	0,12	2,68	20,12	5,49	3,17	66,84	1,08	1,25	0,62	66,87	7,24	9,18	9,65	74,11	3,32
	Amostra média diária	0,23	1,96	20,44	5,72	3,36	65,48	1,20	1,60	0,71	60,01	13,33	9,47	10,22	73,34	3,20
	Média	0,21	1,90	20,34	5,66	3,27	65,76	1,15	2,18	0,72	62,71	11,00	9,48	9,94	73,71	3,23
10-05-2008	0	0,15	2,59	20,14	5,58	3,21	66,69	1,13	1,54	0,70	65,81	8,10	9,36	9,77	73,91	3,31
	2	0,36	2,46	20,22	5,84	3,35	65,98	1,14	1,38	0,55	60,89	12,03	9,81	10,19	72,93	3,26
	4	0,32	1,15	20,10	5,82	3,31	66,14	1,11	1,03	0,65	67,98	6,34	9,82	10,07	74,33	3,29
	6	0,32	2,11	20,15	5,59	3,32	63,59	1,15	3,21	0,88	54,84	16,40	9,20	10,10	71,24	3,16
	8	0,37	0,95	20,64	5,73	3,47	65,14	1,18	1,65	0,62	61,00	13,16	9,31	10,56	74,16	3,16

Tabela IV.5 (continuação): Análise química relativa ao clínquer, correspondente ao período entre 08/05/2008 e 11/05/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	CaO _n (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _t (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	C ₃ S+C ₂ S (%)	C/S (%)
10-05-2008	10	0,14	2,43	20,15	5,69	3,31	65,66	1,10	2,25	0,79	61,31	11,52	9,48	10,07	72,83	3,26
	12	0,18	1,95	20,72	5,71	3,41	66,17	1,22	1,43	0,75	60,73	13,59	9,36	10,38	74,32	3,19
	14	0,22	2,46	20,77	5,72	3,38	65,73	1,19	0,99	0,75	56,46	16,96	9,44	10,29	73,42	3,16
	16	0,43	3,74	20,63	5,77	3,40	65,53	1,19	1,32	0,80	51,13	20,57	9,54	10,35	71,71	3,18
	18	0,29	2,89	20,55	6,23	3,36	64,83	1,18	1,40	0,73	49,32	21,71	10,82	10,22	71,03	3,15
	20	0,25	1,48	20,71	5,49	3,45	66,30	1,17	1,28	0,65	64,67	10,59	8,71	10,50	75,26	3,20
	22	0,33	2,54	20,21	5,79	3,46	65,47	1,28	1,61	0,75	58,75	13,63	9,49	10,53	72,37	3,24
	Amostra média diária	0,30	2,00	20,35	5,71	3,37	65,64	1,16	1,58	0,69	61,24	12,15	9,43	10,25	73,39	3,23
	Média	0,28	2,23	20,42	5,75	3,37	65,60	1,17	1,59	0,72	59,41	13,72	9,53	10,25	73,12	3,21
	0	0,44	5,77	20,21	5,56	3,37	66,13	1,22	1,63	0,77	49,96	20,25	9,03	10,25	70,21	3,27
11-05-2008	2	0,24	3,04	20,17	5,65	3,36	64,97	1,34	2,44	0,74	56,06	15,53	9,29	10,22	71,60	3,22
	4	0,30	1,80	20,57	5,80	3,54	65,63	1,32	1,57	0,67	59,49	14,09	9,38	10,77	73,59	3,19
	6	0,28	3,62	20,48	5,59	3,35	65,29	1,22	1,89	0,81	53,07	18,68	9,15	10,19	71,75	3,19
	8	0,42	5,13	20,77	5,67	3,37	65,32	1,16	0,91	0,72	44,27	26,15	9,32	10,25	70,42	3,14
	10	0,15	2,85	20,40	5,47	3,24	65,21	1,18	1,90	0,79	57,45	15,15	9,01	9,86	72,60	3,20
	12	0,21	2,19	20,68	5,83	3,43	65,56	1,23	1,01	0,64	56,74	16,49	9,65	10,44	73,23	3,17
	14	0,24	5,32	20,78	5,62	3,28	66,32	1,19	1,41	0,73	47,96	23,40	9,34	9,98	71,36	3,19
	16	0,40	3,92	20,57	5,64	3,40	66,53	1,19	0,81	0,69	55,80	16,88	9,19	10,35	72,68	3,23
	Amostra média diária	0,38	3,44	20,33	5,60	3,33	65,26	1,21	1,53	0,73	54,78	16,96	9,21	10,13	71,74	3,21
	Média	0,30	3,74	20,51	5,65	3,37	65,66	1,23	1,51	0,73	53,42	18,51	9,26	10,26	71,94	3,20
Média (do ciclo)	0,25	2,63	20,44	5,70	3,34	65,71	1,17	1,77	0,72	58,37	14,58	9,46	10,16	72,94	3,21	
Desvio padrão	0,09	1,35	0,32	0,17	0,11	0,98	0,08	1,08	0,12	6,60	5,34	0,38	0,32	1,60	0,05	

Tabela IV.6: Análise química relativa ao clínquer, correspondente ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	CaO _w (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _t (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	C ₃ S+C ₂ S (%)	C/S (%)	
04-07-2008	1	0,36	2,84	20,26	5,76	3,12	66,00	1,21	1,49	0,72	59,99	12,83	9,98	9,49	72,82	3,26	
	3	0,37	2,22	20,42	5,78	3,07	65,96	1,28	1,77	0,74	61,07	12,47	10,12	9,34	73,55	3,23	
	5	0,31	1,83	20,37	5,87	3,11	65,64	1,27	2,10	0,74	61,08	12,33	10,29	9,46	73,40	3,22	
	7	0,36	1,66	20,46	5,86	3,16	65,80	1,23	1,38	0,72	61,73	12,09	10,18	9,62	73,82	3,22	
	9	0,45	3,59	19,98	5,38	2,90	65,07	1,20	3,16	0,80	58,15	13,42	9,35	8,82	71,57	3,26	
	11	0,25	1,06	20,47	6,01	3,19	65,98	1,27	1,44	0,62	63,78	10,57	10,53	9,71	74,35	3,22	
	13	0,30	1,64	20,16	6,05	3,21	65,46	1,22	1,69	0,75	61,36	11,51	10,60	9,77	72,87	3,25	
	15	0,12	1,53	20,27	5,97	3,19	65,46	1,21	1,75	0,74	61,54	11,69	10,42	9,71	73,23	3,23	
	17	0,13	1,26	20,48	5,70	3,03	65,56	1,18	1,77	0,69	63,49	10,82	9,98	9,22	74,31	3,20	
	19	0,13	1,44	20,42	5,94	3,11	65,75	1,23	1,43	0,70	62,26	11,58	10,48	9,46	73,84	3,22	
	21	0,14	1,67	20,25	5,74	3,01	65,51	1,20	2,40	0,83	63,13	10,44	10,12	9,16	73,56	3,24	
	23	0,16	1,36	20,12	5,60	2,95	65,35	1,17	2,86	0,76	65,75	8,08	9,85	8,98	73,83	3,25	
	Amostra média diária		0,47	1,70	20,22	5,77	3,14	65,77	1,20	1,91	0,73	63,90	9,76	9,98	9,56	73,67	3,25
	Média		0,26	1,84	20,31	5,81	3,09	65,63	1,22	1,94	0,73	61,94	11,49	10,16	9,40	73,43	3,23
	05-07-2008	1	0,19	0,88	20,62	5,80	3,09	66,15	1,20	1,56	0,65	65,62	9,62	10,14	9,40	75,24	3,21
3		0,32	2,01	20,24	5,78	3,07	65,82	1,21	1,79	0,76	62,73	10,71	10,12	9,34	73,44	3,25	
5		0,26	1,78	20,28	5,86	3,09	66,18	1,19	1,53	0,70	64,26	9,67	10,30	9,40	73,93	3,26	
7		0,25	2,42	20,11	5,92	3,13	66,03	1,21	1,73	0,76	61,87	10,98	10,39	9,52	72,85	3,28	
9		0,31	6,21	19,84	5,64	2,97	66,51	1,21	1,65	0,79	52,56	17,23	9,92	9,04	69,79	3,35	
11		0,20	2,17	20,10	5,84	3,02	65,98	1,22	2,16	0,70	63,46	9,76	10,37	9,19	73,21	3,28	
13		0,29	0,57	20,49	5,79	3,04	66,18	1,23	1,50	0,64	68,13	7,35	10,20	9,25	75,48	3,23	
15	0,38	2,58	20,03	5,82	2,96	66,81	1,23	1,09	0,65	65,92	7,70	10,41	9,01	73,62	3,34		

Tabela IV.6 (continuação): Análise química relativa ao clínquer, correspondente ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h)	PF (%)	CaO _n (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO _t (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	C ₃ S+C ₂ S (%)	C/S (%)
05-07-2008	17	0,41	1,75	19,91	5,70	2,91	66,29	1,21	1,77	0,74	68,97	5,05	10,18	8,86	74,02	3,33
	19	0,41	1,09	20,21	5,67	2,90	66,77	1,26	1,56	0,67	71,55	3,97	10,12	8,82	75,52	3,30
	21	0,46	2,23	19,96	5,86	3,02	66,13	1,30	1,81	0,72	64,75	8,38	10,42	9,19	73,13	3,31
	23	0,35	1,52	20,47	5,63	3,07	65,83	1,17	1,95	0,72	64,02	10,39	9,73	9,34	74,41	3,22
	Amostra média diária	0,66	2,42	20,16	5,75	3,03	66,16	1,21	1,65	0,70	63,31	10,04	10,11	9,22	73,35	3,28
	Média	0,32	2,10	20,19	5,78	3,02	66,22	1,22	1,68	0,71	64,49	9,23	10,19	9,20	73,72	3,28
06-07-2008	1	0,25	2,27	20,81	5,89	3,21	66,49	1,21	1,07	0,66	59,12	15,06	10,18	9,77	74,18	3,20
	3	0,22	1,07	20,62	5,75	3,13	65,87	1,18	1,43	0,69	63,98	10,85	9,94	9,52	74,83	3,19
	5	0,26	1,81	20,62	5,72	3,09	66,16	1,18	1,65	0,74	62,41	12,04	9,93	9,40	74,45	3,21
	7	0,26	1,46	20,50	5,76	3,11	66,50	1,18	1,36	0,69	65,83	9,11	10,00	9,46	74,94	3,24
	9	0,33	2,66	20,14	5,66	3,06	66,03	1,20	2,13	0,75	62,52	10,58	9,82	9,31	73,10	3,28
	11	0,28	1,33	20,24	5,75	3,06	66,29	1,21	1,34	0,69	67,62	7,01	10,06	9,31	74,64	3,28
	13	0,25	0,85	20,34	5,52	3,03	66,42	1,19	1,60	0,76	70,94	4,80	9,50	9,22	75,74	3,27
	15	0,20	1,16	20,92	5,33	2,97	67,07	1,17	1,33	0,69	69,27	7,72	9,10	9,04	76,99	3,21
	17	0,18	1,46	20,88	5,28	2,91	66,12	1,14	1,95	0,86	64,91	10,90	9,07	8,86	75,81	3,17
	19	0,27	0,95	20,51	5,85	3,21	66,17	1,21	1,23	0,71	65,74	9,21	10,07	9,77	74,95	3,23
	21	0,25	0,76	20,34	5,61	3,09	66,13	1,18	1,71	0,71	69,43	5,94	9,64	9,40	75,37	3,25
	23	0,33	2,53	19,65	5,84	3,25	65,26	1,22	2,66	0,77	62,15	9,45	9,98	9,89	71,60	3,32
	Amostra média diária	0,56	2,19	20,26	5,56	3,08	65,82	1,17	1,59	0,71	63,31	10,33	9,52	9,37	73,63	3,25
	Média	0,26	1,53	20,46	5,66	3,09	66,21	1,19	1,62	0,73	65,33	9,39	9,77	9,41	74,72	3,24
	Média (do ciclo)	0,28	1,82	19,77	5,75	3,07	66,02	1,21	1,74	0,72	63,92	10,04	9,77	9,34	73,96	3,25
	Desvio padrão	0,09	1,00	0,28	0,17	0,09	0,44	0,03	0,46	0,05	3,75	2,77	0,36	0,29	1,35	0,04



Anexo V
Módulos químicos

Tabela V.1: Módulos químicos correspondentes ao período entre 08/05/2008 e 11/05/2008.

Data	Colheita (h)	Farinha de alimentação ao forno						Farinha do ciclone 4						Clinquer					
		LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	FL (%)	
08-05-2008	18	103,42	-0,21	2,18	1,72	101,94	0,73	2,21	1,69	100,47	6,34	2,23	1,71	28,70					
	20	103,06	0,07	2,16	1,74	106,87	-2,39	2,18	1,81	97,11	12,64	2,21	1,70	29,27					
	22	104,26	-0,71	2,16	1,76	103,63	-0,32	2,19	1,75	98,79	6,77	2,28	1,73	27,88					
	Amostra média diária	104,33	-0,75	2,17	1,77	104,67	-1,04	2,18	1,72	99,16	8,50	2,25	1,70	28,14					
	Média	103,58	-0,28	2,17	1,74	104,15	-0,66	2,19	1,75	98,79	8,58	2,24	1,71	28,61					
	0	103,71	-0,36	2,18	1,76	103,09	-0,03	2,25	1,73	99,16	5,03	2,28	1,76	27,68					
09-05-2008	2	104,32	-0,78	2,18	1,74	100,88	1,45	2,27	1,71	99,56	8,58	2,33	1,69	31,85					
	4	103,57	-0,31	2,20	1,74	98,28	3,33	2,29	1,76	98,92	4,13	2,19	1,70	28,29					
	6	104,18	-0,61	2,16	1,80	101,00	1,41	2,25	1,73	99,67	4,63	2,26	1,72	28,29					
	8	103,75	-0,40	2,21	1,77	97,84	3,60	2,28	1,71	100,27	4,29	2,28	1,71	28,34					
	10	104,15	-0,66	2,20	1,77	106,44	-2,13	2,20	1,81	100,05	8,00	2,37	1,75	29,20					
	12	103,92	-0,46	2,21	1,83	106,61	-2,24	2,19	1,79	100,08	5,12	2,29	1,73	27,20					
	14	102,82	0,24	2,19	1,77	106,83	-2,36	2,18	1,81	100,75	5,49	2,31	1,77	27,34					
	16	101,50	1,13	2,22	1,78	103,34	-0,11	2,21	1,79	100,40	6,20	2,23	1,75	28,78					
	18	106,74	-2,32	2,19	1,79	103,85	-0,50	2,25	1,77	99,87	7,60	2,25	1,77	29,28					
	20	107,59	-2,80	2,19	1,86	108,57	-3,47	2,22	1,84	103,42	4,68	2,24	1,74	27,82					
	22	106,94	-2,42	2,19	1,82	108,68	-3,54	2,21	1,83	103,48	3,50	2,32	1,73	26,55					
	Amostra média diária	105,04	-1,21	2,18	1,79	103,58	-0,34	2,25	1,75	99,40	5,92	2,25	1,70	28,23					
Média	104,43	-0,81	2,19	1,79	103,79	-0,38	2,23	1,77	100,47	5,60	2,28	1,73	28,38						
10-05-2008	0	102,24	0,56	2,23	1,73	102,22	0,49	2,23	1,66	102,95	4,02	2,29	1,74	27,33					
	2	105,93	-1,78	2,18	1,80	101,36	1,14	2,24	1,72	100,91	5,30	2,20	1,74	28,13					
	4	105,22	-1,31	2,20	1,83	101,56	1,00	2,26	1,73	101,76	2,97	2,20	1,76	27,70					
	6	101,13	1,33	2,21	1,72	93,57	6,69	2,31	1,64	97,99	8,58	2,26	1,68	29,48					

Tabela V.1 (continuação): Módulos químicos correspondentes ao período entre 08/05/2008 e 11/05/2008.

Data	Colheita (h)	Farinha de alimentação ao forno					Farinha do ciclone 4					Clinquer				
		LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	1,74	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	1,60	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	1,65
10-05-2008	8	101,72	0,95	2,20	1,74	91,80	8,01	2,34	1,60	97,92	5,84	2,24	1,65	28,45		
	10	102,81	0,23	2,20	1,75	105,41	-1,52	2,18	1,74	101,02	5,85	2,24	1,72	28,66		
	12	100,23	1,98	2,24	1,76	100,75	1,62	2,21	1,75	99,23	5,82	2,27	1,67	28,20		
	14	100,16	2,03	2,24	1,76	102,44	0,48	2,23	1,78	98,38	6,71	2,28	1,69	27,70		
	16	101,92	0,88	2,19	1,79	104,87	-1,08	2,18	1,81	98,55	8,39	2,25	1,70	28,27		
	18	102,50	0,48	2,17	1,78	105,52	-1,66	2,24	1,72	97,13	8,82	2,14	1,85	29,56		
	20	104,17	-0,74	2,21	1,72	104,49	-0,95	2,21	1,73	99,79	4,63	2,32	1,59	27,33		
	22	102,61	0,31	2,22	1,72	104,89	-1,18	2,22	1,76	100,14	6,08	2,18	1,67	28,80		
	Amostra média diária	101,88	0,83	2,23	1,75	101,14	1,29	2,25	1,72	100,03	5,49	2,24	1,69	28,14		
	Média	102,55	0,41	2,21	1,76	101,57	1,09	2,24	1,72	99,65	6,08	2,24	1,71	28,30		
11-05-2008	0	102,61	0,33	2,23	1,75	103,24	-0,07	2,23	1,77	101,64	8,74	2,26	1,65	27,88		
	2	104,38	-0,87	2,19	1,71	103,37	-0,23	2,25	1,73	99,89	7,55	2,24	1,68	29,03		
	4	101,91	0,84	2,21	1,77	104,50	-0,86	2,22	1,81	98,76	6,12	2,20	1,64	28,93		
	6	101,50	1,09	2,21	1,74	102,79	0,21	2,23	1,76	99,17	8,24	2,29	1,67	28,23		
	8	103,22	-0,09	2,20	1,72	103,64	-0,32	2,19	1,76	97,85	10,23	2,30	1,68	27,38		
	10	101,12	1,39	2,23	1,79	103,70	-0,35	2,22	1,80	99,70	6,93	2,34	1,69	27,57		
	12	102,38	0,55	2,19	1,78	106,17	-1,93	2,19	1,83	98,26	6,55	2,23	1,70	28,09		
	14	103,17	-0,04	2,22	1,75	105,84	-1,77	2,21	1,78	99,49	9,58	2,33	1,71	27,57		
	16	102,59	0,37	2,24	1,78	106,02	-1,85	2,21	1,81	100,53	6,60	2,28	1,66	27,26		
	Amostra média diária	101,69	0,95	2,24	1,75	105,08	-1,28	2,21	1,78	99,76	7,31	2,28	1,68	27,76		
Média	102,54	0,40	2,21	1,76	104,36	-0,80	2,22	1,78	99,48	7,84	2,28	1,68	27,99			
Média (do ciclo)	103,26	-0,06	2,20	1,77	103,22	-0,02	2,23	1,76	99,81	6,57	2,26	1,71	28,28			
Desvio padrão	1,74	1,14	0,02	0,04	3,60	2,44	0,04	0,05	1,55	2,06	0,05	0,05	0,95			

Tabela V.2: Módulos químicos correspondentes ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h) ²	Farinha de alimentação ao forno				Farinha do ciclone 4				Clinker				
		LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	FL (%)
04-07-2008	0	102,08	0,93	2,16	1,93	99,07	2,82	2,24	1,78	101,15	5,71	2,28	1,85	27,72
	2	102,31	0,83	2,16	1,98	99,56	2,52	2,24	1,83	100,42	5,76	2,31	1,88	28,04
	4	102,21	0,89	2,15	1,97	96,66	4,53	2,28	1,77	99,95	5,97	2,27	1,89	28,72
	6	101,30	1,46	2,19	1,94	97,56	3,87	2,29	1,78	99,78	5,28	2,27	1,85	28,02
	8	101,51	1,33	2,22	1,99	97,72	3,75	2,30	1,78	101,84	7,50	2,41	1,86	27,83
	10	102,51	0,74	2,17	2,04	99,30	2,69	2,25	1,82	99,73	4,74	2,23	1,88	28,54
	12	103,19	0,23	2,16	1,98	99,61	2,53	2,23	1,86	100,17	5,34	2,18	1,88	29,03
	14	103,39	0,09	2,16	1,97	100,81	1,70	2,22	1,87	99,85	5,45	2,21	1,87	28,79
	16	101,32	1,43	2,20	1,93	97,53	3,92	2,29	1,79	99,73	5,15	2,35	1,88	27,56
	18	102,18	0,93	2,18	2,00	100,23	2,08	2,23	1,85	99,79	5,13	2,26	1,91	28,18
05-07-2008	20	103,77	-0,14	2,17	2,01	98,92	2,95	2,25	1,81	100,60	5,56	2,31	1,91	28,42
	22	102,92	0,36	2,19	1,95	100,99	1,61	2,19	1,87	101,22	5,10	2,35	1,90	28,23
	Amostra média diária	103,16	0,18	2,18	1,93	98,99	2,87	2,28	1,81	100,93	4,90	2,27	1,84	28,22
	Média	102,44	0,72	2,17	1,97	99,00	2,91	2,25	1,82	100,35	5,56	2,29	1,88	28,26
	0	103,68	-0,13	2,17	1,96	97,75	3,76	2,29	1,81	99,81	4,49	2,32	1,88	27,76
	2	104,67	-0,78	2,19	1,99	99,55	2,53	2,27	1,85	100,98	5,16	2,29	1,88	28,01
	4	103,40	0,08	2,17	1,98	100,48	1,87	2,25	1,83	101,20	4,54	2,27	1,90	27,95
	6	104,01	-0,36	2,16	1,94	99,23	2,78	2,25	1,85	101,57	5,21	2,22	1,89	28,50
	8	105,44	-1,31	2,19	1,96	99,99	2,26	2,24	1,87	104,19	7,71	2,30	1,90	27,25
	10	104,78	-0,77	2,16	2,05	102,10	0,91	2,22	1,96	101,79	5,12	2,27	1,93	28,40

² A colheita de amostras de clínquer (no período entre 04/07/2008 e 06/07/2008) corresponde à hora de colheita de amostras de farinha de alimentação ao forno e do ciclone 4, mais 1 hora.

Tabela V.2 (continuação): Módulos químicos correspondentes ao período entre 04/07/2008 e 06/07/2008.

Data	Colheita (h)	Farinha de alimentação ao forno						Farinha do ciclone 4						Clinker					
		LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	LSF (%)	Δ (%)	MS (%)	MA (%)	FL (%)	
05-07-2008	12	105,20	-1,11	2,15	1,97	99,14	2,83	2,24	1,84	100,47	3,65	2,32	1,90	27,58					
	14	108,34	-3,08	2,18	2,05	99,69	2,40	2,26	1,81	103,49	3,53	2,28	1,97	27,09					
	16	108,12	-2,96	2,17	2,03	99,95	2,27	2,28	1,88	103,49	3,13	2,31	1,96	27,37					
	18	105,62	-1,35	2,17	2,02	102,75	0,39	2,23	1,89	102,95	2,54	2,36	1,96	27,03					
	20	106,91	-2,18	2,15	2,02	102,29	0,78	2,22	1,97	102,61	4,35	2,25	1,94	28,21					
	22	103,37	-0,01	2,22	1,91	100,13	2,15	2,27	1,87	100,26	5,14	2,35	1,83	27,64					
	Amostra média diária	105,47	-1,42	2,10	1,79	100,99	1,50	2,26	1,83	101,95	4,82	2,30	1,90	27,63					
	Média	105,30	-1,16	2,17	1,99	100,25	2,08	2,25	1,87	101,90	4,55	2,30	1,91	27,73					
	0	103,22	0,11	2,24	1,94	99,19	2,73	2,29	1,82	99,25	6,04	2,29	1,83	27,83					
	2	103,42	-0,05	2,22	1,91	97,93	3,56	2,30	1,74	99,42	4,84	2,32	1,84	27,59					
06-07-2008	4	102,09	0,89	2,23	1,95	97,14	4,14	2,31	1,75	99,95	5,46	2,34	1,85	27,68					
	6	106,01	-1,76	2,22	1,91	95,74	5,15	2,32	1,73	100,89	4,18	2,31	1,85	27,51					
	8	105,89	-1,75	2,27	1,89	99,34	2,62	2,29	1,81	101,96	5,43	2,31	1,85	27,95					
	10	106,44	-1,98	2,23	1,98	104,05	-0,58	2,29	1,86	101,77	3,45	2,30	1,88	27,38					
	12	105,80	-1,54	2,22	2,00	101,52	1,18	2,27	1,88	101,96	2,86	2,38	1,82	26,93					
	14	101,14	1,32	2,36	1,83	97,16	4,18	2,36	1,83	100,83	3,64	2,52	1,79	25,86					
	16	104,31	-0,79	2,31	1,84	96,88	4,24	2,41	1,73	99,71	5,30	2,55	1,81	26,34					
	18	105,16	-1,28	2,27	1,87	98,66	2,99	2,36	1,75	100,09	4,09	2,26	1,82	27,92					
	20	105,37	-1,45	2,27	1,85	99,51	2,40	2,37	1,77	101,29	3,34	2,34	1,82	27,38					
	22	107,14	-2,59	2,29	1,87	105,28	-1,41	2,29	1,84	102,42	5,50	2,16	1,80	29,48					
Amostra média diária	105,00	-1,14	2,27	1,91	99,16	2,67	2,34	1,77	101,26	4,88	2,34	1,81	27,08						
Média	104,66	-0,91	2,26	1,90	99,37	2,60	2,32	1,79	100,80	4,51	2,34	1,83	27,49						
Média (do ciclo)	104,13	-0,45	2,20	1,96	99,54	2,53	2,27	1,83	101,02	4,87	2,31	1,82	27,82						
Desvio padrão	1,95	1,29	0,05	0,06	2,05	1,39	0,05	0,06	1,27	1,14	0,08	0,04	0,71						



Anexo VI
Parâmetros do processo



Anexo VII

Energia

Tabela VII.1: Energia utilizada correspondente ao período de pré-paragem.

	Fevereiro 2008 (kWh/t)	Março 2008 (kWh/t)	Abril 2008 (kWh/t)
Britagem	0,90	1,04	0,96
Moag Crú	22,10	21,10	22,19
Motor Moag Crú	16,99	12,27	13,19
Bx tensão Mog Crú (kwh/t)	5,16	4,41	3,97
Forno	36,08	36,42	36,61
Motor Forno	1,5	1,8	1,8
Moag Carvão	51,36	51,62	52,11
Motor Moag Carvão	32,77	32,82	34,08
Bx tensão Mog Carvão	17,06	20,50	18,91
Moag Cimento 1	34,76	34,59	37,78
Motor Moag Cimento 1	28,0	21,0	29,0
Bx tensão Mog Cim 1	4,86	3,58	4,89
Moag Cimento 3	44,45	45,67	43,57
Motor Moag Cimento 3	33,4	26,6	32,4
Bx tensão Mog Cim 3	8,55	6,67	8,17
Total Clinquer	76,87	78,06	79,65
Total Moag Cimento	39,95	40,33	41,05
Total (kwh/t cimento)	98,83	102,29	100,86

Tabela VII.2: Energia utilizada correspondente ao período de pós-paragem.

	Junho 2008 (kWh/t)	Julho 2008 (kWh/t)	Agosto 2008 (kWh/t)
Britagem	1,09	1,07	1,04
Moag Crú	21,79	21,97	22,40
Motor Moag Crú	13,61	13,05	12,74
Bx tensão Mog Crú	4,89	4,22	4,03
Forno	37,15	37,27	37,40
Motor Forno	2,1	2,5	2,3
Moag Carvão	53,13	49,69	48,18
Motor Moag Carvão	37,68	35,60	33,01
Bx tensão Mog Carvão	18,61	15,63	15,21
Moag Cimento 1	37,47	37,41	36,43
Motor Moag Cimento 1	29,0	31,0	29,0
Bx tensão Mog Cim 1	5,06	5,06	4,87
Moag Cimento 3	46,29	43,72	44,18
Motor Moag Cimento 3	34,0	32,1	32,7
Bx tensão Mog Cim 3	8,42	7,82	8,06
Total Clinquer	77,91	79,34	80,05
Total Moag Cimento	42,69	41,34	41,05
Total (kwh/t cimento)	104,54	98,90	98,30

Anexo VIII
Moagens de cimento

Tabela VIII.1: Análises do cimento (CEM II/ A-L 42.5R) correspondente ao período de pré-paragem.

	CEM II/ A-L 42.5R		
	Fevereiro 2008	Março 2008	Abril 2008
Incorporação de k (%)	80,32	79,38	79,09
Incorporação de filer (%)	11,29	12,15	12,22
Incorporação de gesso (%)	8,39	8,47	8,69
PF (%)	6,46 (0,17)	6,76 (0,33)	7,19 (0,34)
SO3 (%)	3,24 (0,18)	3,24 (0,11)	3,23 (0,18)
R90 (mm)	0,08 (0,02)	0,07 (0,02)	0,06 (0,01)
R45 (mm)	6,0 (0,6)	5,3 (0,7)	5,3 (0,8)
CaO lv (%)	1,62 (0,45)	2,05 (0,25)	1,76 (0,33)
H2O amassadura (%)	27,9 (0,2)	28,0 (0,0)	28,0 (0,1)
R2d (MPa)	31,3 (1,1)	32,1 (1,0)	31,7 (1,1)
R7d (MPa)	45,1 (0,8)	46,4 (0,7)	47,1 (1,6)
R28d (MPa)	54,3 (0,4)	55,3 (1,1)	56,0 (0,9)

Tabela VIII.2: Análises do cimento (CEM II/ B-L 32.5N) correspondente ao período de pré-paragem.

	CEM II/ B-L 32.5N		
	Fevereiro 2008	Março 2008	Abril 2008
Incorporação de k (%)	72,32	71,43	69,92
Incorporação de filer (%)	19,50	20,26	21,45
Incorporação de gesso (%)	8,16	8,31	8,63
PF (%)	9,62 (0,36)	9,64 (0,49)	10,27 (0,35)
SO3 (%)	3,04 (0,06)	3,04 (0,18)	3,01(0,10)
R90 (mm)	2,70 (0,52)	2,54 (0,26)	2,53 (0,49)
R45 (mm)	17,6 (2,2)	18,5 (1,0)	18,3 (1,9)
CaO lv (%)	1,91 (0,47)	2,51 (0,47)	2,35 (0,43)
H2O amassadura (%)	26,3 (0,1)	26,2 (0,1)	26,3 (0,2)
R2d (MPa)	22,6 (1,7)	21,9 (0,9)	21,7 (1,4)
R7d (MPa)	33,3 (1,8)	32,9 (1,0)	32,8 (1,8)
R28d (MPa)	39,8 (1,4)	40,3 (1,0)	39,9 (1,7)

Tabela VIII.3: Análises do cimento (CEM II/ A-L 42.5R) correspondente ao período de pós-paragem.

	CEM II/ A-L 42.5R		
	Junho 2008	Julho 2008	Agosto 2008
Incorporação de k (%)	82,58	76,74	76,48
Incorporação de filer (%)	8,14	14,64	15,05
Incorporação de gesso (%)	9,27	8,62	8,47
PF (%)	4,70 (1,78)	7,47 (0,13)	7,78 (0,19)
SO3 (%)	3,44 (0,36)	3,16 (0,10)	3,36 (0,12)
R90 (mm)	0,06 (0,02)	0,07 (0,02)	0,16 (0,04)
R45 (mm)	4,2 (1,1)	6,7 (1,6)	9,8 (0,9)
CaO Iv (%)	2,03 (0,58)	1,16 (0,26)	1,02 (0,20)
H2O amassadura (%)	28,3 (0,3)	27,6 (0,5)	27,3 (0,1)
R2d (MPa)	29,2 (3,0)	31,7 (0,9)	30,0 (1,3)
R7d (MPa)	46,3 (2,1)	47,5 (1,1)	43,4 (1,5)
R28d (MPa)	58,1 (2,7)	55,9 (1,6)	52,3 (1,0)

Tabela VIII.4: Análises do cimento (CEM II/ B-L 32.5N) correspondente ao período de pós-paragem.

	CEM II/ B-L 32.5N		
	Junho 2008	Julho 2008	Agosto 2008
Incorporação de k (%)	74,73	65,64	64,19
Incorporação de filer (%)	16,61	25,71	27,32
Incorporação de gesso (%)	8,66	8,65	8,49
PF (%)	8,60 (1,15)	11,16 (0,76)	11,51 (0,79)
SO3 (%)	3,20 (0,26)	2,97 (0,13)	3,20 (0,18)
R90 (mm)	2,96 (0,42)	3,30 (0,46)	3,30 (0,76)
R45 (mm)	19,0 (1,7)	20,0 (1,3)	20,2 (2,0)
CaO Iv (%)	2,20 (0,60)	1,45 (0,36)	1,34 (0,27)
H2O amassadura (%)	26,2 (0,1)	26,1 (0,1)	26,7 (0,2)
R2d (MPa)	21,5 (1,9)	20,3 (1,0)	19,1 (2,3)
R7d (MPa)	32,8 (1,8)	30,7 (1,3)	29,4 (3,0)
R28d (MPa)	41,2 (1,6)	38,4 (1,6)	35,2 (1,0)

Anexo IX

Adições às moagens de cimento

Tabela IX.1: Análises químicas do calcário correspondente ao período de pré-paragem.

NºColheita	Calcário								
	Fevereiro 2008			Março 2008		Abril 2008			Local
	Piso 9	Piso 10	Piso 11	Piso 9	Piso 11	Piso 9	Piso 10	Piso 11	
P.F. (%)	43,03	42,86	43,22	43,25	42,73	43,11	43,04	42,95	
SiO ₂ (%)	1,50	1,00	0,74	0,61	1,25	0,73	0,77	0,82	
Al ₂ O ₃ (%)	0,91	0,87	0,60	0,56	0,82	0,55	0,61	0,64	
Fe ₂ O ₃ (%)	0,20	0,22	0,15	0,15	0,24	0,12	0,15	0,15	
CaO (%)	53,27	53,58	53,89	54,03	53,37	54,01	53,77	53,62	
MgO (%)	0,61	0,63	0,62	0,56	0,58	0,59	0,69	0,67	
SO ₃ (%)	0,19	0,09	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07	
K ₂ O (%)	0,10	0,10	0,08	0,06	0,10	0,08	0,09	0,09	
LSF (%)	997,38	1369,98	1899,54	2224,37	1167,83	1976,22	1833,90	1726,89	
MS (%)	1,35	0,92	0,99	0,86	1,18	1,09	1,01	1,04	
MA (%)	4,55	3,95	4,00	3,73	3,42	4,58	4,07	4,27	

Tabela IX.2: Análises químicas do gesso correspondente ao período de pré-paragem.

NºColheita	Gesso		
	Janeiro 2008	Março 2008	Abril 2008
P.F. (%)	20,33	20,26	20,52
SiO ₂ (%)	14,60	13,95	4,11
Al ₂ O ₃ (%)	2,97	2,83	0,77
Fe ₂ O ₃ (%)	1,59	1,43	0,30
CaO (%)	25,93	26,86	30,07
MgO (%)	2,56	2,55	1,25
SO ₃ (%)	29,95	30,79	42,14
K ₂ O (%)	0,57	0,55	0,18

Tabela IX.3: Análises químicas do calcário correspondente ao período de pós-paragem.

	Calcário						
	Junho 2008	Julho 2008			Agosto 2008		
Nº Colheita	5221B	5355B	5356B	5357B	5466B	5467B	5468B
Local	Piso 9	Piso 8	Piso 9	Piso 10	Piso 7	Piso 8	Piso 10
P.F. (%)	43,24	42,81	41,56	42,99	42,96	42,76	42,17
SiO₂ (%)	0,54	0,81	2,51	0,62	0,22	0,08	1,47
Al₂O₃ (%)	0,54	0,71	1,74	0,57	0,38	0,71	1,05
Fe₂O₃ (%)	0,11	0,20	0,72	0,13	0,06	0,18	0,31
CaO (%)	53,85	54,01	51,84	53,60	54,90	53,92	53,47
MgO (%)	0,62	0,56	0,57	0,65	0,52	0,60	0,55
SO₃ (%)	0,09	0,09	0,07	0,08	0,07	0,09	0,09
K₂O (%)	0,09	0,09	0,18	0,08	0,04	0,08	0,11
LSF (%)	2466,79	1693,63	548,80	2184,19	5102,23	4767,46	974,31
MS (%)	0,83	0,89	1,02	0,89	0,50	0,09	1,08
MA (%)	4,91	3,55	2,42	4,38	6,33	3,94	3,39

Tabela IX.4: Análises químicas do gesso correspondente ao período de pós-paragem.

	Gesso			
	Junho 2008		Julho 2008	Agosto 2008
Nº Colheita	5168B	5189B	5227B	5374B
P.F. (%)	21,63	21,65	21,59	21,14
SiO₂ (%)	11,93	11,06	8,67	12,58
Al₂O₃ (%)	2,46	2,32	1,85	2,25
Fe₂O₃ (%)	1,23	1,15	0,88	1,18
CaO (%)	27,84	28,72	29,06	27,77
MgO (%)	2,63	2,00	1,94	2,37
SO₃ (%)	31,16	31,97	35,23	32,21
K₂O (%)	0,48	0,43	0,35	0,42

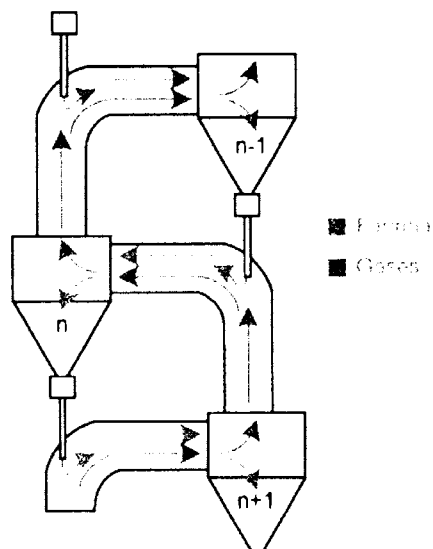


Figura 3: Esquema representativo de uma torre de ciclones de pré-aquecimento.

Um pré-aquecedor de ciclones é constituído por uma série de ciclones em cascata no interior de uma torre, sobre múltiplos andares. Torre esta que pode possuir até 6 andares de ciclones e atingir uma altura de 125m (Lopes; Leitão, sem data). No caso particular do Centro de Produção de Loulé o pré-aquecedor de ciclones é constituído por uma torre de 4 andares, onde no primeiro andar estão 2 ciclones que funcionam como um só, o ciclone 1 e o ciclone 1 bis, no segundo andar está o ciclone 2, no terceiro andar está o ciclone 3 e no quarto andar o ciclone 4.

Um ventilador de tiragem de grande capacidade, o ventilador exaustor, assegura a circulação ascendente dos gases quentes provenientes do forno no conjunto dos ciclones. O caudal do exaustor é regulado em função da combustão no forno (Lopes; Leitão, sem data).

A farinha crua é introduzida na parte superior da torre, na conduta de entrada dos ciclones do andar superior. Estes ciclones apresentam uma eficiência de separação superior aos restantes andares, a fim de diminuir a saída de material pela conduta de saída da torre. A farinha é alimentada à torre através de uma bomba pneumática ou através de um elevador, alimentados a partir de um doseador ponderal comandado a partir da sala de comando (Lopes; Leitão, sem data).

A matéria desce por gravidade de um ciclone, para a conduta do ciclone do andar inferior, através de uma conduta de pequeno diâmetro. A corrente gasosa ascendente proveniente do ciclone inferior encontra-se com esta matéria e dirige-se para o ciclone do andar superior através de uma conduta de grandes dimensões. É nestas condutas que ocorre uma importante parte da troca térmica (Lopes; Leitão, sem data).

Os gases que saem do forno a uma temperatura na ordem dos 1000°C, após atravessarem o pré-aquecedor, possuem uma temperatura na ordem dos 280 a 400°C, dependendo, entre outros factores, do número de andares da torre. Estes gases são enviados para os moinhos de cru com o intuito de serem reutilizados (Lopes; Leitão, sem data).

A farinha entra na torre a uma temperatura de 60 a 80°C, chegando à saída entre 30 a 60s e com uma temperatura na ordem dos 850°C. Encontra-se parcialmente descarbonatada, variando o seu grau de descarbonatação entre 20 e 50%. O emprego de pré-calcinadores permite aumentar o grau de descarbonatação até 95% (Lopes; Leitão, sem data).

3.3.1.1.3. Pré-calcinador

A utilização de equipamentos de pré-calcinação, inseridos entre o pré-aquecedor e o forno, datam apenas dos anos 70, tendo sido a sua expansão muito rápida (apesar de ser um equipamento opcional) devido ao seu elevado desempenho (Lopes; Leitão, sem data).

A reacção de descarbonatação é muito endotérmica, consome cerca de 400kcal/kg de clínquer entre 800 e 900°C. Para uma idêntica capacidade de produção, a pré-calcinação apresenta o interesse de levar a uma diminuição das dimensões do forno, uma vez que aí apenas terá de realizar-se a conclusão da descarbonatação e a clinquerização. Para idênticas dimensões do forno, a pré-calcinação permite um aumento importante da capacidade de produção. O pré-

calcinador está equipado com um queimador específico, sendo o ar para a combustão proveniente da entrada do arrefecedor (Lopes; Leitão, sem data).

Além de todas estas vantagens, a pré-calcinação permite ainda, de um modo geral, que a própria marcha do forno se torne mais regular.

3.3.1.2. Forno (tubo rotativo)

O forno é o elemento principal de uma instalação de fabrico de clínquer. Antigamente, e ainda actualmente (no estrangeiro) nas fábricas de pequena produção (até 500t/dia) o forno é vertical (“shaft kilns”) mas após a descoberta do forno rotativo, este tem sido utilizado cada vez com mais frequência, uma vez que permite uma produção de 8000t/dia e um produto final mais homogéneo (Coutinho, 2006).

O forno rotativo, constituído por um cilindro de chapa de aço com diâmetro e comprimento que podem atingir até 7,6m e 232m, respectivamente, é revestido inteiramente com material refractário. O cilindro assenta sobre roletes que o fazem girar e tem uma inclinação de 2 a 6°. O movimento de rotação (1 a 3,5 rotações/min.) e a inclinação provocam o avanço dos materiais no interior do forno. No extremo inferior introduz-se o combustível e o respectivo ar comburente, proveniente do arrefecedor de clínquer (Coutinho, 2006). Funciona como um permutador de calor em contra-corrente, no qual a chama é dirigida da saída para a entrada do tubo, que eleva a uma temperatura extremamente alta a farinha que avança em sentido oposto. A farinha, proveniente do pré-aquecedor e introduzida na entrada do forno, leva cerca de 30 a 90min até cair no arrefecedor sob a forma de clínquer (Lopes; Leitão, sem data).