

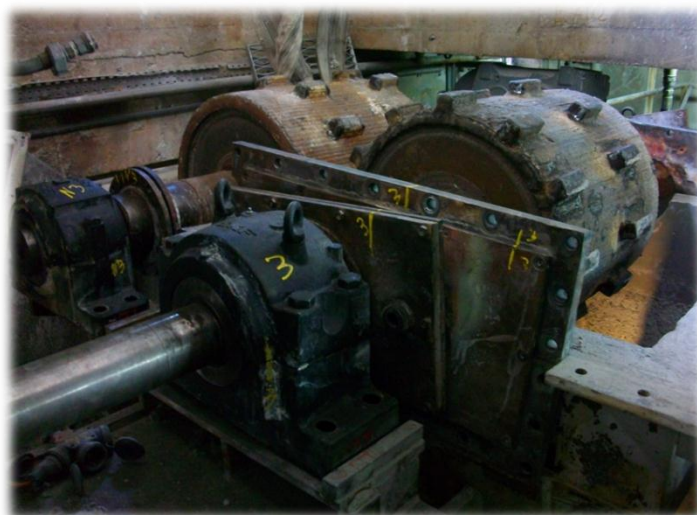


Instituto Politécnico de Coimbra

Instituto Superior de Engenharia

Intervenções de Manutenção na Linha de Fabrico de Cimento Branco

OPTIMIZAÇÃO DO BRITADOR DE CLÍNQUER



Luís Miguel Agostinho Henriques

Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

COIMBRA

2010



Instituto Politécnico de Coimbra

Instituto Superior de Engenharia

Intervenções de Manutenção na Linha de Fabrico de Cimento Branco

OPTIMIZAÇÃO DO BRITADOR DE CLÍNQUER

Orientadores:

*Luís Filipe Pires Borrego
Professor Coordenador, ISEC*

*Carlos Alberto do Carmo Coelho Rebelo
Professor Adjunto, ISEC*

Supervisor de Estágio na Empresa:

*Nuno Filipe Fonseca Nogueira Serens
Director de Manutenção, SECIL*

Luís Miguel Agostinho Henriques

**Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em
Equipamentos e Sistemas Mecânicos**

COIMBRA

2010

Dedicatória

Aos meus pais, irmão e irmã

Agradecimentos

Este trabalho só foi possível com o apoio e colaboração de inúmeras pessoas a quem quero agradecer, das quais destaco o Professor Carlos Rebelo e o Professor Luís Borrego pela orientação do estágio realizado, e o Engenheiro Nuno Serens, pela sua supervisão técnica e prática, pela compreensão e disponibilidade demonstrada, pelo esforço desenvolvido e por todos os ensinamentos relativos ao mundo cimenteiro que em muito contribuíram para a minha formação.

Agradeço ao Engenheiro João Pereira, na actual Direcção de Produção da fábrica Cibra, pelos meios proporcionados ao desenvolvimento das minhas competências e queria igualmente agradecer a atenção e simpatia com que me receberam, sem excepção, todos os colaboradores.

Manifesto especiais agradecimentos aos Engenheiros Luís Costa, Michael Mendonça, Fernando Vitorino, Lucas, Filipe Santos, Mendes Silva, José Gouveia, Vasco Castela, Márcio Figueiredo e ao Srs. Agnelo Ferreira, Hélder Frazão, José Claro, Carlos Salvador, Adriano Fachada e António Gil pela partilha de informação, pela disponibilidade, pelo espírito de equipa e colaboração técnica que demonstraram, pois esse apoio foi imprescindível para a execução deste trabalho.

Para terminar, um grande agradecimento aos meus pais, irmão, irmã, namorada e restantes familiares pelo apoio incondicional, que permitiram criar condições à realização deste trabalho.

A todos um bem-haja.

Resumo

No âmbito do estágio integrante do Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos, Área de Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, foi desenvolvido um trabalho de **Optimização do Britador de Clínquer Branco**.

Este trabalho tem como base o estudo de um dos equipamentos de vital importância na linha de fabrico de cimento branco da fábrica Cibra-Pataias, onde o estágio foi realizado.

O estudo apresentado incide num problema de perdas de produção significativas devidas à falha do britador de clínquer branco. O referido equipamento apresenta um elevado número de falhas em serviço e consequentemente provoca perdas de produção significativas. O problema atinge também uma dimensão elevada no que respeita aos tempos de reparação, reposição do processo produtivo e custos associados.

Palavras-chave: cimento branco; manutenção; britador de clínquer.

Abstract

Within the internship of the Master in Mechanical Equipments and Systems, Specialization in Construction and Maintenance of Mechanical Equipments, of Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, a process of Optimization of the White Clinker Crusher was developed.

This work is based on a study of vital importance equipment in the production line of white cement factory in Cibra-Pataias, where this internship was performed.

The present study focuses on a problem of significant production losses due to failure of the white clinker crusher. This equipment presents a high number of failures in service, which leads to significant production losses. The problem is also important in regard to the time of repair, replacement of the production process and associated costs.

Keywords: white cement; maintenance; optimization, clinker crusher

Índice

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Âmbito e objectivo do estágio	1
1.2 Plano de trabalhos	2
1.3 Estruturação do relatório de estágio	3
2 Indústria Cimenteira	5
2.1 O cimento	5
2.2 Indústria cimenteira em Portugal	6
2.3 Secil	7
2.4 Cibra	8
2.5 Enquadramento da Manutenção	10
3 Fabrico de Cimento na Fábrica Cibra	11
3.1 Extracção das Matérias-Primas	13
3.2 Preparação das Matérias-Primas	14
3.2.1 Transporte, armazenamento e homogeneização	14
3.2.2 Moagem de cru	15
3.3 Processo de Clinquerização	17
3.3.1 Clínquer cinzento	17
3.3.2 Clínquer branco	18
3.4 Moagem e Armazenagem de Cimento	19
3.5 Embalagem e expedição de cimento	20
3.6 Diferenças Entre os Processos de Fabrico de Cimento Cinzento e Branco	20
4 Equipamentos Integrantes da Linha de Fabrico de Cimento Branco	21
4.1 Extracção das matérias-primas	21
4.1.1 Britador primário	21
4.2 Preparação das Matérias-Primas	25

4.2.1	Transporte	25
4.2.2	Armazenamento	25
4.2.3	Matérias-primas secundárias	27
4.2.4	Moagem de cru	29
4.3	Processo de Clinquerização	33
4.3.1	Balança de alimentação de cru	35
4.3.2	Prato granulador	35
4.3.3	Grelha Lepol	36
4.3.4	Forno	37
4.3.5	Queimador	38
4.3.6	Britador de clínquer	39
4.3.7	Tambor redutor	39
4.4	Moagem de cimento	40
4.4.1	Transporte metálico	40
4.4.2	Elevador de clínquer	41
4.4.3	Moinho de cimento	42
4.5	Embalagem de Cimento	43
4.5.1	Ensacadeira de cimento branco	43
4.5.2	Paletizadora	44
5	Britador de Clínquer Branco	45
5.1	Britador de rolos	45
5.2	Componentes do britador de clínquer branco	46
5.2.1	Aro de ligação ao cabeçote	46
5.2.2	Funil superior	48
5.2.3	Tampa superior	48
5.2.4	Protecção dos veios dos rolos	49
5.2.5	Veios	50
5.2.6	Rolo de compressão	50
5.2.7	Vedação entre funil superior e a tampa superior	51
5.2.8	Tampa inferior	51
5.2.9	Funil inferior	51
5.2.10	Sistema de Accionamento	52
5.3	Condições de operação	52
5.4	Concepção do britador	54
5.5	Problemas verificados após operação e suas causas	55
6	Optimização do britador de clínquer branco	63

6.1	Alterações ao nível do corpo do britador	63
6.2	Alterações ao nível do sistema de tratamento da água do britador	75
7	Análise de custos	79
8	Conclusões	83
9	Referências	85
10	Anexos	87

Lista de Figuras

Fig. 2.1 – Fábrica da Maceira	7
Fig. 2.2 – Fábrica do Outão	8
Fig. 2.3 – Fábrica Cibra	9
Fig. 3.1 – Linha de produção de cimento branco	12
Fig. 3.2 – Linha de produção de cimento cinzento	12
Fig. 3.3 – Pedreiras de calcários e argilas (à esquerda) e de calcário branco (à direita)	13
Fig. 3.4 – Matérias-primas secundárias: ladrilhos (à esquerda) e loiças (à direita)	13
Fig. 3.5 – Parque circular de pré-homogeneização da matéria-prima do cimento cinzento	15
Fig. 3.6 – Moinho de bolas e esquema de funcionamento	16
Fig. 3.7 – Interior de um silo de armazenagem de cru	16
Fig. 3.8 – Forno da linha de cimento cinzento	18
Fig. 3.9 – Paletes plastificadas de cimento branco	20
Fig. 4.1 – Britador primário de martelos	22
Fig. 4.2 – Representação esquemática do funcionamento de um britador de martelos	22
Fig. 4.3 – Diversos formatos de martelos (em cima) e martelo bimetálico (em baixo)	24
Fig. 4.4 – Grelhas do britador	24
Fig. 4.5 – Telas transportadoras	25
Fig. 4.6 – Silos de armazenamento de calcário branco: exterior (à esquerda) e base (à direita)	26
Fig. 4.7 – Doseadoras de calcário branco	26
Fig. 4.8 – Preparação das natas de mármore (à esquerda) e esteira e desagregador (à direita)	27
Fig. 4.9 – Balança doseadora de natas de mármore	28
Fig. 4.10 – Silo de areia branca	28
Fig. 4.11 – Balança doseadora de caulino	29
Fig. 4.12 – Alimentação das matérias-primas à moagem de cru	30
Fig. 4.13 – Britador secador da moagem de cru	30
Fig. 4.14 – Moinho de cru	31
Fig. 4.15 – Elevador de saída do moinho de cru	31
Fig. 4.16 – Separador da moagem de cru	32
Fig. 4.17 – Silos de cru	32
Fig. 4.18 – Sinóptico do forno de branco	34
Fig. 4.19 – Balança doseadora de cru (à esquerda) e pormenor do tapete de cru (à direita)	35

Fig. 4.20 – Prato granulador (à esquerda) e grânulos formados (à direita)	36
Fig. 4.21 – Grelha Lepol (à esquerda) e grelha (à direita)	36
Fig. 4.22 – Interior da grelha Lepol	37
Fig. 4.23 – Forno de branco	37
Fig. 4.24 – Aplicação de tijolo refractário no interior do forno	38
Fig. 4.25 – Queimador do forno de branco	39
Fig. 4.26 – Exterior do tambor redutor (à esquerda) e segunda câmara (à direita)	40
Fig. 4.27 – Transporte metálico (à esquerda) e clínquer à saída do tambor redutor (à direita)	41
Fig. 4.28 – Elevador de clínquer	41
Fig. 4.29 – Formas de gesso (à esquerda) e balança doseadora de gesso (à direita)	42
Fig. 4.30 – Moinho de cimento branco	43
Fig. 4.31 – Ensacadeira de cimento branco (à esquerda) e bica de enchimento (à direita)	43
Fig. 4.32 – Formação da camada (à esquerda) e formação da paleta (à direita)	44
Fig. 5.1 – Britador de rolos simples (à esquerda) e britador de rolos duplos (à direita)	45
Fig. 5.2 – Britador de rolos	46
Fig. 5.3 – Aro de ligação ao cabeçote	47
Fig. 5.4 – Cabeçote do forno e queimador	47
Fig. 5.5 – Funil superior e tampa superior	49
Fig. 5.6 – Protecção dos veios dos rolos	49
Fig. 5.7 – Montagem de um rolo de compressão no veio	50
Fig. 5.8 – Vedação entre funil superior e tampa superior	51
Fig. 5.9 – Funil inferior	52
Fig. 5.10 – Incrustações e grânulos no interior do forno de cimento branco	53
Fig. 5.11 – Posição do britador de clínquer relativamente ao forno	55
Fig. 5.12 – Arrancamento do revestimento nas arestas do dente	56
Fig. 5.13 – Arrancamento completo do revestimento na superfície do dente	56
Fig. 5.14 – Fenómeno de fissuração a frio na superfície do rolo de compressão	57
Fig. 5.15 – Desunião do revestimento com o metal de base	58
Fig. 5.16 – Heterogeneidade na transição entre tijolos	59
Fig. 5.17 – Parafusos de fixação do tijolo refractário	60
Fig. 5.18 – Precipitação de calcário no britador de clínquer	60
Fig. 6.1 – Superfície do rolo após preparação	63
Fig. 6.2 – Microestruturas do cordão DO*390N com escala de 20 μm (à esquerda) e 5 μm (à direita)	68
Fig. 6.3 – Superfície lisa do dente do rolo revestido e sem fissuração a frio apresentando microfissuras anti-tensões	69

Fig. 6.4 – Perfil arredondado do dente	70
Fig. 6.5 – Corte longitudinal do conjunto do rotor	71
Fig. 6.6 – Presença de calcário à saída do veio	71
Fig. 6.7 – Técnica de estanhagem (à esquerda) e técnica de estanhagem com soldadura em multipasses (à direita)	72
Fig. 6.8 – Sequência de soldadura com “passo de peregrino”	73
Fig. 6.9 – Efeito de batimento dos cordões	73
Fig. 6.10 – Protecção dos veios dos rolos revestida a betão	74
Fig. 6.11 – Funil superior com betão refractário	75

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Cronograma do Plano de Estágio	2
Tabela 5.1 – Composição química do tijolo Refracta R2000	48
Tabela 5.2 – Composição química do eléctrodo Castolin DO*33	57
Tabela 6.1 – Composição química do aço dos rolos de compressão	65
Tabela 6.2 – Composição química do eléctrodo Castolin DO*390N	66
Tabela 6.3 – Resultado comparativo do teste ASTM G65 para as ligas DO*33 e DO*390N	67
Tabela 6.4 – Dureza da água	76
Tabela 7.1 – Custo dos combustíveis de aquecimento do forno	79
Tabela 7.2 – Análise do custo diário de não produção	80
Tabela 7.3 – Custos totais associados a uma paragem não programada de cinco dias	81
Tabela 8.1 – Soluções apresentadas para os problemas do britador de clínquer	83

1 Introdução

1.1 Âmbito e objectivo do estágio

Para muitas organizações, entre as quais se encontra a Cibra, é importante responder à pressão competitiva global, procurando aumentar as suas produtividades, maximizando a eficácia total do equipamento e assegurando um programa de manutenção eficiente.

O conceito de Manutenção tem evoluído e continua a evoluir no tempo e, consequentemente, dentro de cada organização.

A Manutenção assume um papel determinante visto ser essencial para garantir a operacionalidade dos equipamentos utilizados nos processos produtivos, influenciando de forma significativa o nível de qualidade dos bens produzidos e os custos de produção.

Uma manutenção planeada, que actua no momento exacto, maximizando os meios de produção, é por excelência o modelo ideal para a minimização dos custos de manutenção inerentes. Por um lado, maximizando a utilização dos equipamentos, por outro, minimizando os custos causados por paragens imprevistas ou mesmo por intervenções e substituições desnecessárias.

Com este trabalho pretende-se dar um contributo válido na melhoria das acções correctivas e preventivas da manutenção, de modo a alcançar resultados de disponibilidade superiores aos actuais, e desta feita, chegar a objectivos ansiados pelos departamentos de manutenção e produção da Cibra.

O presente estágio insere-se no âmbito do *Mestrado de Equipamentos e Sistemas Mecânicos* do Instituto de Engenharia de Coimbra e tem por objectivos: aprofundar a formação académica em contexto de trabalho; contactar com diversos tipos de equipamentos mecânicos e diferentes procedimentos utilizados na sua manutenção; possibilitar o desenvolvimento de competências ao nível da resolução de problemas complexos, nomeadamente através da integração nas actividades de manutenção dos equipamentos mecânicos e ao participar no projecto de optimização do funcionamento do britador de clínquer branco da Fábrica Cibra-Pataias, pertencente à empresa CMP – Cimentos Maceira e Pataias, S.A. (grupo SECIL).

Na Fábrica Cibra-Pataias, um dos equipamentos sujeito a condições de funcionamento mais adversas e que tem requerido frequentes intervenções de manutenção, constituindo mesmo um elemento crítico na linha de produção é o britador de clínquer branco.

Assim, o principal objectivo do presente trabalho é otimizar o britador de clínquer branco mediante alterações à construção e condições de funcionamento deste, tendo em conta o seu papel vital na linha e procurando evitar a sua falha com inevitáveis custos associados.

1.2 Plano de trabalhos

Para que se possa melhorar este equipamento foi definido um plano de estágio cujas fases visam obter as informações necessárias para o correcto procedimento de optimização. O plano de estágio compreendeu as seguintes fases:

Fase 1 - Conhecimento do processo de fabrico do cimento

Fase 2 - Análise do funcionamento dos equipamentos integrantes da linha de fabrico de cimento branco

Fase 3 - Análise detalhada do funcionamento do britador de clínquer branco

Fase 4 - Projecto de optimização mecânica do britador de clínquer branco

Fase 5 - Elaboração do relatório final de estágio

O cronograma seguinte expõe a distribuição temporal das fases contidas no plano de estágio.

Tabela 2.1 – Cronograma do Plano de Estágio

Mês	Dez.09	Jan.10	Fev.10	Mar.10	Abr.10	Mai.10	Jun.10	Jul. 10	Ago.10	Set.10
N.º horas	80	175	160	175	175	175	175	175	95	175
Fase 1										
Fase 2										
Fase 3										
Fase 4										
Fase 5										

1.3 Estruturação do relatório de estágio

O presente relatório está estruturado em 8 capítulos.

No presente capítulo (capítulo 1) pretende-se dar a conhecer o fundamento deste estudo e apresentar genericamente o trabalho desenvolvido. São apresentados o âmbito e objectivo e a própria estrutura do relatório de estágio.

No capítulo 2 faz-se uma breve introdução ao tema “Cimento”. Assim, é feito o enquadramento deste produto e são apresentadas as empresas Secil e Cibra. Faz-se também um enquadramento da Manutenção.

No capítulo 3 descrevem-se os processos de fabrico dos cimentos cinzento e branco de acordo com as suas principais fases.

No capítulo 4 descrevem-se com maior detalhe os equipamentos que integram a linha de fabrico de cimento branco sendo esta descrição acompanhada com um breve resumo às práticas de manutenção desenvolvidas pelos profissionais da manutenção.

No capítulo 5 explicam-se o princípio de funcionamento e condições de operação do britador de clínquer branco. Expõem-se as principais ideias consideradas na concepção do britador, os problemas verificados após operação e as suas causas.

No capítulo 6 descreve-se e apresenta-se a aplicação do tema propriamente dito, isto é, a aplicação prática da análise das falhas do britador. Podem-se encontrar neste capítulo as alterações implementadas com intuito de otimizar o britador de clínquer por forma a obter melhorias significativas da sua disponibilidade.

No capítulo 7 evidencia-se a importância de evitar a falha do britador de clínquer através da determinação dos custos de oportunidade associados àquele acontecimento.

No capítulo 8 faz-se a análise do trabalho desenvolvido, são enunciadas algumas conclusões e perspectivas de trabalho futuro neste âmbito.

Após o capítulo 8 seguem-se as referências bibliográficas, que contemplam as fontes pesquisadas e que serviram de base à fundamentação e desenvolvimento da dissertação.

No final deste trabalho é apresentado um conjunto de anexos, onde se encontram os desenhos de construção mecânica do britador e fichas técnicas de alguns dos materiais referidos durante este trabalho.

Importa, nesta fase, referir que a descrição dos equipamentos integrantes da linha de fabrico de cimento branco e, principalmente, a descrição do próprio processo de fabrico de cimento branco não são do senso comum, existindo confidencialidade em relação a esta temática, pelo que, carece de algum cuidado na sua abordagem tendo esta apenas a profundidade necessária à compreensão do trabalho desenvolvido.

2 Indústria Cimenteira

Neste capítulo é efectuado um pequeno enquadramento do cimento, da indústria cimenteira em Portugal, das empresas Secil e Cibra e da função manutenção elucidando sobre a sua aplicabilidade neste tipo de indústria.

2.1 O cimento

A necessidade em encontrar melhor e maior segurança e consequente durabilidade para as construções, leva a que o Homem prossiga ao longo dos tempos numa experimentação de diversos materiais aglomerantes. Conforme relatos longínquos, os romanos chamavam esses materiais de "caementum", termo que posteriormente originou a palavra cimento.

Em 1756 um engenheiro de nome John Smeaton, enquanto procurava um material aglomerante que se tornasse resistente mesmo na presença de água e que viesse a facilitar o trabalho de reconstrução do farol de Edystone, na Inglaterra, verificou nas suas várias tentativas, que uma mistura calcinada de calcário e argila se tornava, depois de seca, tão resistente quanto as pedras então utilizadas nas construções.

No entanto a afirmação e consolidação desta descoberta, pertence a um pedreiro, Joseph Aspdin, que em 1824, requer o registo da patente deste produto, ao qual atribuirá a designação de cimento Portland, numa referência à Portlandstone, tipo de pedra arenosa frequentemente usada em construções na região de Portland em Inglaterra.

No pedido de patente comprova e faz constar que o calcário era moído com argila, em meio húmido. A água era então, evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de um cano com vapor. Os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e depois moídos bem finos, dando lugar a uma espécie de argamassa.

Após patenteado, o cimento Portland desencadeia uma verdadeira e desenvolta revolução na construção, muito particularmente pelo conjunto inédito das suas propriedades, nomeadamente as resistências aos esforços e por ser obtido a partir de matérias-primas relativamente abundantes e disponíveis na natureza.

A preocupação dos arquitectos e projectistas aliado a modernos métodos de cálculo e o empenho dos construtores impulsionaram o avanço das tecnologias do cimento, as quais possibilitam ao homem transformar o meio em que vive, conforme as suas necessidades, e atendendo cada vez mais a uma exigência de melhoria nas edificações. A descoberta de novos aditivos, que numa constante procura de uma melhoria que se pretende, possibilitam a obtenção de um produto de alto desempenho e superior aceitação no consumidor, o qual encontra naquele uma resistência à compressão até 10 vezes superiores às até então admitidas nos cálculos das estruturas dos edifícios.

Obras cada vez mais arrojadas e indispensáveis, que propiciam conforto, bem-estar (barragens, pontes, viadutos, edifícios, estações de tratamento de água, rodovias, portos e aeroportos) e o contínuo surgimento de novos produtos e aplicações fazem do cimento um dos produtos mais consumidos da actualidade, conferindo uma dimensão estratégica à sua produção e comercialização.

2.2 Indústria cimenteira em Portugal

Segundo Gonçalves [2005] em Portugal, a primeira fábrica de cimento surgiu em 1866, segundo parece, localizada em Alcântara. Esta e outras duas que se lhe seguiram, devido a dificuldades económicas e à má qualidade do cimento produzido tiveram vida efémera. Em 1894 foi concedido alvará para a montagem da fábrica de Alhandra, que mais tarde, pelas mesmas razões, teve de ser encerrada, reabrindo em 1912.

Em 1906 surge a fábrica de Outão, com o nome de "Compagnie de Ciments du Portugal", sendo em 1918 vendida e dando origem à "Companhia Geral de Cal e Cimento" que, em 1925 aluga as suas instalações à "Sociedade de Empreendimentos Comerciais e Industriais Limitada": estava criada a marca SECIL.

Em 1975 ocorreu a nacionalização da indústria cimenteira.

Em 1976 constituiu-se a CIMPOR - Cimentos de Portugal, E.P. e em 1991 constituiu-se como sociedade anónima, passando a designar-se CIMPOR - Cimentos de Portugal, S.A.

Em 1991 é feita a constituição da SEMAPA com o objectivo de concorrer à reprivatização das empresas "Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A." e "CMP – Cimentos Maceira e Pataias, S.A.".

Em Junho de 1994 a SEMAPA foi vencedora do concurso de reprivatização, tendo adquirido 51% da "Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A." e 80% da "CMP – Cimentos Maceira e Pataias, S.A." e em Novembro do mesmo ano, a SEMAPA vende à Secil 80% da CMP.

Em suma, neste momento, operam em Portugal duas empresas cimenteiras, a Cimpor e a Secil, que exploram seis fábricas de cimento, com uma capacidade total de produção de cimento superior a 10 milhões de toneladas/ano. A Cimpor explora as fábricas de Souselas, Alhandra e Loulé enquanto que a Secil explora as fábricas de Maceira, Pataias e Outão.

2.3 Secil

Um conjunto de cerca de 40 empresas constitui hoje o Universo SECIL, sendo a fábrica Cibra-Pataias uma unidade industrial de grande importância, onde são produzidos os cimentos branco e cinzento da marca Cibra.

A produção de cimento é o núcleo da actividade da Secil, que integra, além da fábrica de Pataias, mais duas fábricas em Portugal: uma em Maceira (Fig. 2.1) e outra no Outão (Fig. 2.2) – onde a Secil teve origem há quase um século atrás.



Fig. 2.1 – Fábrica da Maceira



Fig. 2.2 – Fábrica do Outão

Secil, Maceira-Liz e Cibra são as três marcas de cimento que a empresa actualmente comercializa e cuja produção é feita sob um apertado controlo de fabrico, de modo a manter altos padrões de qualidade que as certificações nacionais e internacionais exigem.

A Secil orgulha-se de ter vindo a merecer a confiança contínua dos seus clientes, fruto da qualidade do que produz e dos serviços que presta, particularmente através de uma assistência técnica muito activa. Orgulha-se também do modo como assume a sua responsabilidade social, ao empenhar-se na manutenção de um justo equilíbrio entre a eficácia da sua actividade económica e a preservação do meio ambiente em que actua.

2.4 Cibra

Em 1944, numa época em que a produção de cimento era manifestamente insuficiente para as necessidades existentes e as indústrias de mosaico hidráulico eram obrigadas a importar do estrangeiro o cimento branco de que necessitavam, nasce a CIBRA – Companhia Portuguesa de Cimentos Brancos, S.A.R.L.

A Cibra instalou-se em Pataias decidida a tirar partido das vantagens naturais da região, cuja pedra e areias apresentavam a qualidade necessária ao fabrico daquele tipo de cimento e já tinham justificado a fabricação, na zona, do único ligante utilizado na construção do Mosteiro de Alcobaça.

Inaugurada em 5 de Fevereiro de 1950, a primeira linha de fabrico de cimento branco era constituída por um forno rotativo e pelos demais equipamentos complementares, necessários ao fabrico daquele tipo de cimento.

A produção de cimento branco é um processo complexo e, ao mesmo tempo, estimulante, face aos enormes desafios que decorrem de uma grande exigência de qualidade, não só nos parâmetros tradicionais do produto, como sejam as resistências à compressão e flexão, mas também nas características estéticas que justificam a procura deste material, essencialmente traduzidas nos seus níveis de brancura e reflectância.

Trata-se de um processo produtivo cujo êxito depende da qualidade das matérias-primas e também da qualidade profissional dos técnicos que o controlam, exercida de modo persistente e de uma permanente ambição de superar os níveis atingidos.

A notável evolução que a qualidade do cimento branco Cibra® conheceu nos últimos anos constitui um claro reconhecimento dessa qualidade profissional.

Assumindo as mais variadas texturas e cores, depois de pigmentado, o cimento branco pode contribuir significativamente para a qualidade estética da obra arquitectónica, de que são exemplo a Torre do Tombo, o Pavilhão do Conhecimento dos Mares, a Basílica de Fátima, a Casa da Música e a Casa das Histórias de Paula Rego.

A Fábrica Cibra (Fig. 2.3) é a única fábrica de cimento em Portugal que se dedica à produção de cimento branco.

As exigências de fabrico deste tipo de produto colocam-se não só ao nível da qualidade da matéria-prima utilizada, mas também em termos do funcionamento adequado de toda a linha de produção, revestindo-se de particular importância a manutenção de todos os equipamentos mecânicos.



Fig. 2.3 – Fábrica Cibra

2.5 Enquadramento da Manutenção

De acordo com Ferreira [1998], todos os parques de equipamentos estão sujeitos a deterioração. Para garantir que uma instalação assegure as funções para que foi projectada e realizada é necessário que as suas instalações e equipamentos sejam mantidos nas condições adequadas de funcionamento. Para isso devem realizar-se reparações às máquinas, inspecções, intervenções preventivas, substituições de órgãos e peças, mudanças de óleo, limpezas, pinturas, correcção de defeitos, fabricação de componentes para substituição de outros já gastos, etc. Ao conjunto destas e outras acções designamos por *procedimentos de manutenção*.

Assim, pode definir-se **Manutenção** como o conjunto de acções destinadas a assegurar o bom funcionamento dos equipamentos e instalações, garantindo que são sujeitas a intervenções oportunas e com o alcance adequado, de forma a evitar a sua avaria ou a diminuição de rendimento e, no caso de tal acontecer, que sejam repostas em boas condições de operacionalidade com a maior brevidade, tudo a um custo global optimizado.

3 Fabrico de Cimento na Fábrica Cibra

Neste capítulo é efectuada a exposição sumária dos processos de fabrico dos cimentos cinzento e branco na fábrica Cibra e enunciadas as principais diferenças entre estes.

A informação contida e descrita ao longo deste capítulo foi fornecida, na sua maioria, pela Secil sobre a forma de documentação interna diversa, tais como fichas técnicas, catálogos, manuais e livros técnicos.

As operações do processo de produção de cimento agrupam-se sumariamente, nas seguintes fases:

- Extracção das matérias-primas;
- Preparação das matérias-primas;
- Clinquerização;
- Moagem de cimento;
- Embalagem e expedição de cimento.

Existem, no entanto algumas diferenças entre os processos de fabrico de cimento branco e cinzento. A Fig. 3.1 e a Fig. 3.2 representam a linha de produção de cimento branco e a linha de produção de cimento cinzento, respectivamente.

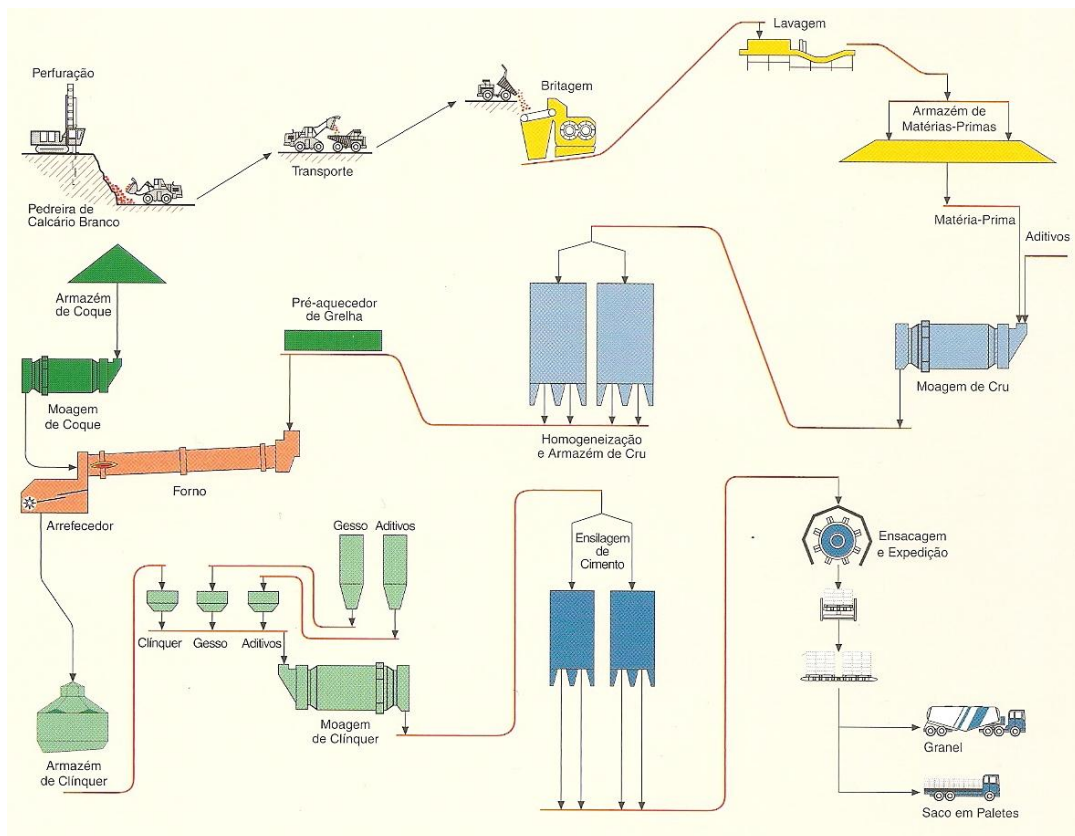


Fig. 3.1 – Linha de produção de cimento branco

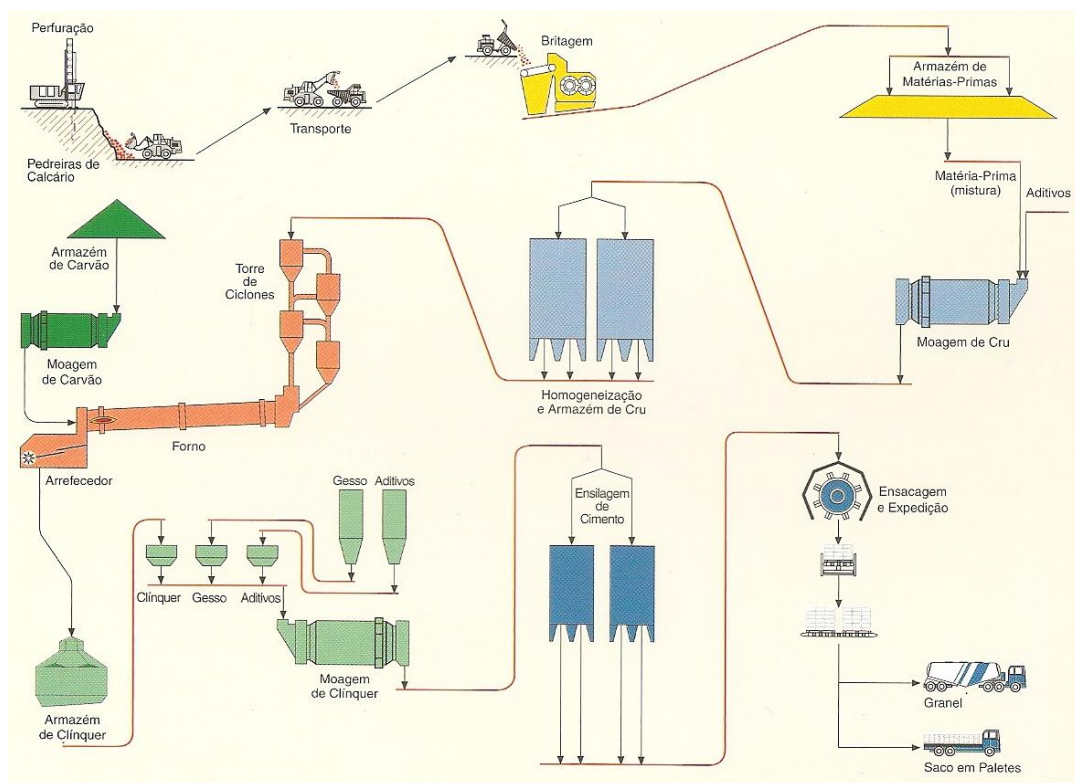


Fig. 3.2 – Linha de produção de cimento cinzento

3.1 Extracção das Matérias-Primas

As matérias-primas extraídas das pedreiras são os calcários e as argilas (no caso do cimento branco somente calcário branco). A exploração das pedreiras é feita a céu aberto, por patamares, como mostra a Fig. 3.3, sendo efectuado o desmonte com explosivos, criteriosamente aplicados de modo a minimizar as vibrações.



Fig. 3.3 – Pedreiras de calcários e argilas (à esquerda) e de calcário branco (à direita)

A minimização do impacte visual é feita através da recuperação paisagística das frentes finalizadas, havendo a preocupação em diminuir a utilização dos recursos naturais, recorrendo à incorporação de matérias-primas secundárias, tais como, lamas de cal, resíduos de fabrico de peças cerâmicas, representadas na Fig. 3.4 (tijolos, ladrilhos, telhas, loiças), moldes fora de uso, betão, areias de fundição, granalha usada, tijolo refractário usado, entre outros.



Fig. 3.4 – Matérias-primas secundárias: ladrilhos (à esquerda) e loiças (à direita)

As matérias-primas do cimento cinzento devem conter, em determinadas proporções, cálcio, sílica, alumina e ferro. Normalmente é necessário corrigir um ou dois destes elementos recorrendo-se a outras pedreiras ou a resíduos que contenham os elementos necessários como é o caso da areia contaminada utilizada em decapagens, na correcção da sílica.

No caso das matérias-primas para o fabrico do cimento branco, para além do calcário branco com alto teor em CaCO_3 e com teores de óxidos metálicos significativamente reduzidos são utilizadas outras matérias-primas tais como, as argilas caulínicas e areias adquiridas ao exterior. Estas cumprem especificações igualmente rigorosas no que diz respeito aos teores em óxidos metálicos, granulometria e humidade.

O calcário, após extracção, apresenta-se em grandes blocos (até cerca de $\frac{1}{2} \text{ m}^3$), pelo que se torna necessário reduzir o seu tamanho para uma granulometria (inferior a 90 mm) compatível com o transporte, armazenagem e alimentação das fases de fabrico seguintes, operação que é feita num britador (no caso do cimento branco o calcário pode ainda ser sujeito a uma operação de lavagem, a fim de retirar as argilas para evitar qualquer coloração).

Ao mesmo tempo que se efectua a britagem, procura-se que a mistura dos materiais extraídos se aproxime da composição química desejada alimentando o britador com determinadas proporções de calcários de diferentes zonas da pedreira (tendo em conta as sondagens provadas, isto é, sondagens extensivas que permitem confirmar a quantidade, mineralogia, variação e a disponibilidade legal de exploração).

3.2 Preparação das Matérias-Primas

3.2.1 Transporte, armazenamento e homogeneização

O material britado é transportado para a fábrica por telas transportadoras de borracha. Estas possuem captadores de metais que retiram os metais da tela por efeito magnético e, posteriormente, detectores de metais que param as telas, caso alguma metal tenha passado pelo captador de metais, permitindo retirar os metais manualmente. Estes metais, que podem ser peças das máquinas da pedreira, se prosseguissem nos circuitos provocariam danos nas próprias telas e nos restantes equipamentos.

A minimização das emissões de partículas é conseguida através da rega dos circuitos dos transportes nas pedreiras e através de numerosos filtros de mangas ao longo de todo o circuito de transporte e armazenagem das matérias-primas.

As matérias-primas britadas são armazenadas em silos verticais, no caso do calcário branco, ou num armazém circular de pré-homogeneização das matérias-primas (representado na Fig. 3.5), no caso da linha de cimento cinzento. Os silos são depósitos que, para além da função armazenagem, têm o papel de homogeneizar o material, quer à entrada, quer à saída do mesmo.

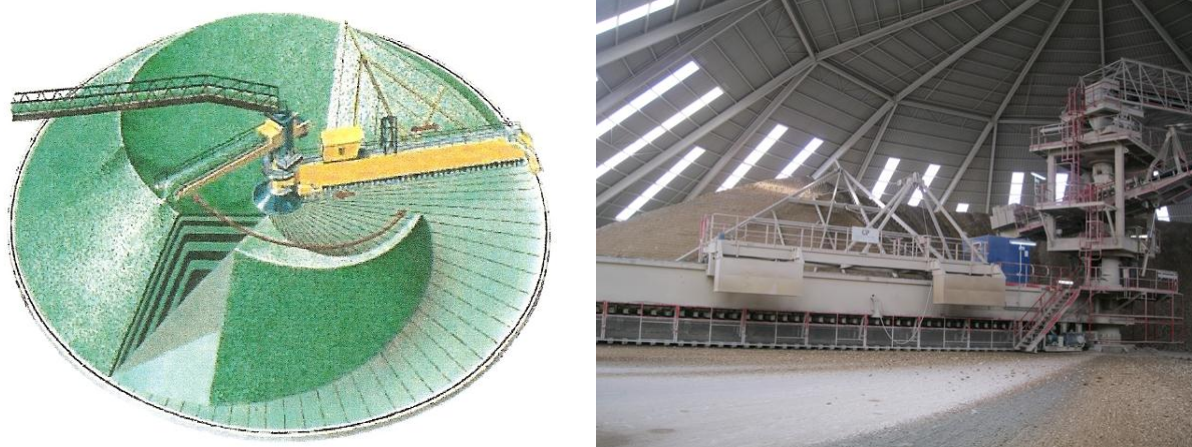


Fig. 3.5 – Parque circular de pré-homogeneização da matéria-prima do cimento cinzento

No processo de cimento cinzento, a máquina de extracção é um pente que ao cortar o monte transversalmente provoca a queda e a mistura dos materiais das várias camadas, homogeneizando-os. A mistura pré-homogeneizada e os materiais de correcção são doseados à saída dos sistemas de homogeneização, tendo em consideração a qualidade do produto a obter. Esta operação é controlada por computador.

3.2.2 Moagem de cru

Os materiais doseados são finamente moídos em moinhos tubulares horizontais, com corpos moentes (bolas de aço), designados por moinhos de bolas, esquematicamente representados na Fig. 3.6. Nestes moinhos é obtido um produto designado por "cru" (matérias-primas homogeneizadas) que é novamente homogeneizado e ensilado em silos próprios.

A imagem esquematicamente representada na Fig. 3.7 mostra o interior do silo com as várias camadas de material que se formam ao serem depositadas no centro do topo do silo.

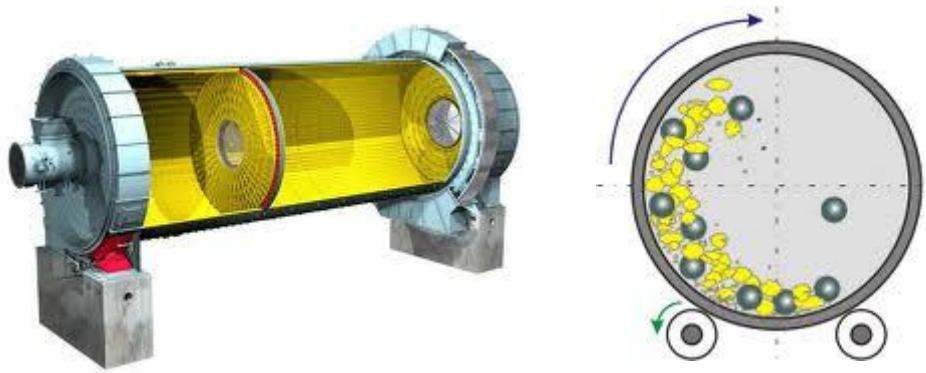


Fig. 3.6 – Moinho de bolas e esquema de funcionamento

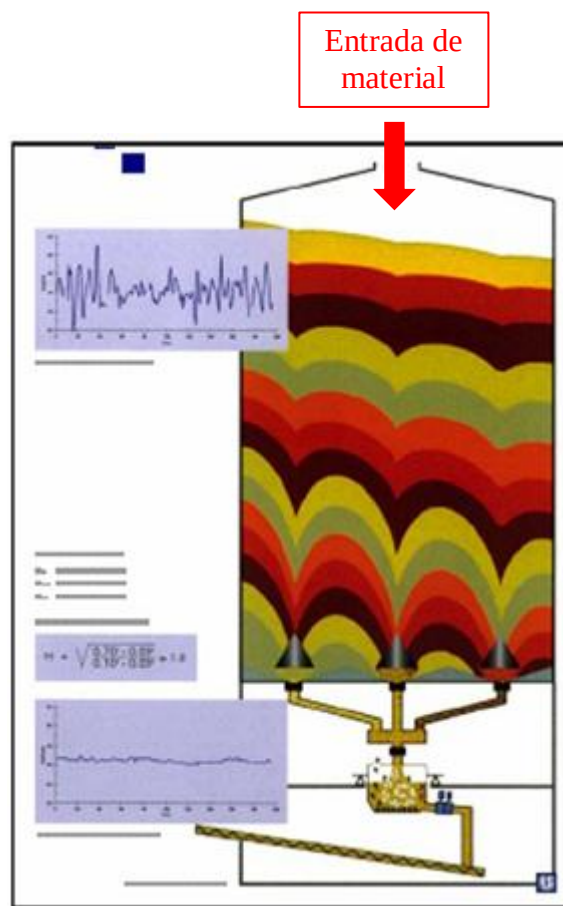


Fig. 3.7 – Interior de um silo de armazenagem de cru

A extracção por várias vias no fundo do silo e de forma programada provoca uma homogeneização do material que se extrai. O gráfico superior desta imagem mostra o desvio padrão da composição química à entrada e o gráfico inferior dá a indicação o desvio padrão à saída. O factor de homogeneização nestes silos chega a ser de oito vezes.

3.3 Processo de Clinquerização

3.3.1 Clínquer cinzento

O cru homogeneizado é extraído dos silos de armazenagem e introduzido no sistema de pré-aquecimento (torre de ciclones) com pré-calcinação. Os gases de escape resultantes da queima do combustível sobem pela torre de ciclones e ao longo do percurso vão fazendo a transferência do calor para o material, aquecendo-o continuamente à medida que este avança de ciclone em ciclone até ao forno.

No pré-calcinador dá-se a descarbonatação do cru, isto é, a separação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2), sendo este último encaminhado juntamente com os gases do forno para a torre de condicionamento de gases onde se reduzem as emissões de partículas.

Seguidamente o material entra no forno apresentado na Fig. 3.8, deslocando-se ao longo deste devido à sua rotação e ligeira inclinação (3,5%), prosseguindo o aquecimento e desenrolando-se as reacções físico-químicas do processo da clinquerização a uma temperatura de cerca de 1450°C (obtida através da combustão de coque de petróleo, VFV (Veículos em Fim de Vida), estilha de madeira, farinhas animais, CDF (Combustíveis Derivados de Resíduos), pneus usados de veículos previamente triturados e outros) obtendo-se o clínquer (produto da calcinação da mistura do calcário (75 a 80%), da argila (20 a 25%) e de componentes químicos como o silício, o alumínio e o ferro). O consumo calorífico específico do forno é de 780 Kcal/kg de clínquer.



Fig. 3.8 – Forno da linha de cimento cinzento

A partir dos 1450 °C inicia-se o arrefecimento do clínquer, ainda dentro do forno, sendo a sua fase mais intensa efectuada nos arrefecedores de grelhas, onde é introduzido ar para o arrefecimento do clínquer, aproveitando-se, posteriormente, este ar aquecido como ar de queima secundário no forno e ar de queima terciário no pré-calcinador. Desta forma há uma recuperação parcial do conteúdo térmico do clínquer.

3.3.2 Clínquer branco

O cru é extraído dos silos de homogeneização e misturado com água (11-12% de humidade final) aquando da sua granulação no prato granulador. Os grânulos são enviados a um pré-aquecedor composto por uma grelha móvel dividida em duas câmaras, denominada Grelha Lepol®.

Na segunda câmara do pré-aquecedor, os gases que saem do forno (a cerca de 1100°C) começam por atravessar transversalmente o leito de grânulos onde provocam a sua descarbonatação parcial. Seguidamente, os gases já arrefecidos a cerca de 400 °C passam pela primeira câmara, onde atravessam o respectivo leito de grânulos, provocando a sua secagem.

O material assim preparado entra no forno e, analogamente ao processo de cimento cinzento, obtém-se o clínquer branco.

Como o teor de fundentes é baixo pela ausência nomeadamente, de óxido de ferro para conseguir a fase líquida que permita a clinquerização do cru, a temperatura de clinquerização é sempre superior à do clínquer cinzento, da ordem dos 1550 °C (obtida pela combustão de coque de petróleo). O consumo de energia no forno com grelha Lepol é bastante superior ao conseguido num forno com torre de pré-aquecimento, sendo da ordem dos 1460 Kcal/kg de clínquer.

Por outro lado exige uma selecção cuidada do combustível a utilizar, já que não são admissíveis cinzas resultantes da sua queima para não serem introduzidos elementos pigmentários.

Para assegurar a brancura do clínquer é necessário que o seu arrefecimento seja brusco com água nebulizada (provocando a têmpera do clínquer) e se processe em atmosfera redutora num equipamento designado por tambor redutor.

A atmosfera redutora caracteriza-se pela insuficiência de oxigénio no tambor, conseguida pela queima incompleta de GPL (Gás de Petróleo Liquefeito) através de um queimador, de forma a mitigar a presença de óxidos metálicos responsáveis pela “descoloração” do clínquer branco.

3.4 Moagem e Armazenagem de Cimento

O clínquer, o gesso (regulador da presa do cimento) e *fillers* calcários (pó de filtro e finos) são moídos em moinhos de bolas, em proporções bem definidas, de acordo com o plano de qualidade, obtendo-se os diferentes tipos de cimento, que são armazenados nos respectivos silos verticais devidamente identificados.

A mistura é moída pelo moinho e é transportada pelo elevador que introduz o cimento no separador. O material que é introduzido no separador rege-se por dois processos diferentes, ou seja, se o cimento ficar com a finura desejada segue para o filtro de despoeiramento e para os silos, constituindo o produto final, mas se o cimento ainda não tiver a finura desejada, volta ao moinho para nova moagem, seguindo depois o circuito já descrito.

A operação de moagem pode também contribuir para o índice de brancura dos cimentos brancos, pelo que são visadas finuras mais elevadas do que nos cimentos cinzentos.

3.5 Embalagem e expedição de cimento

A comercialização do cimento é feita quer a granel, em cisternas ferroviárias ou rodoviárias, quer em sacos sobre paletes de madeira, normais ou plastificadas (Fig. 3.9).

Os postos de carregamento do granel rodovia funcionam em regime de *self-service*. O empacotamento é feito em linhas de enchimento de sacos e de paletização automatizadas.

A substituição dos sacos de 50 kg por sacos de 40 kg e de 25 kg vieram permitir uma utilização mais ergonómica destas embalagens em obra.



Fig. 3.9 – Paletes plastificadas de cimento branco

3.6 Diferenças Entre os Processos de Fabrico de Cimento Cinzento e Branco

De acordo com o que foi descrito, as principais diferenças no processo produtivo de cimento branco relativamente ao de cimento cinzento prendem-se com a selecção criteriosa de matérias-primas mais nobres, o processo ser por via semi-seca (processo de fabrico de cimento em que a matéria-prima alimenta o forno com uma humidade de cerca de 10-12%) e a existência de um tambor redutor com dupla função de proceder à redução dos óxidos metálicos e arrefecer o clínquer produzido.

4 Equipamentos Integrantes da Linha de Fabrico de Cimento Branco

Neste capítulo analisam-se os principais equipamentos que integram a linha de fabrico de cimento expondo a sua importância no processo. Esta análise será feita de acordo com as fases do processo de fabrico de cimento branco.

Serve também, a leitura desta secção para uma melhor familiarização com os equipamentos, processos, metodologias e terminologia utilizados na indústria cimenteira, constituindo uma informação importante para uma melhor compreensão de todo o estudo apresentado.

Ainda neste capítulo é feito um breve resumo de algumas práticas de manutenção desenvolvidas pelos profissionais da manutenção nos equipamentos, tendo também participado em muitas destas tarefas no âmbito do estágio realizado.

4.1 Extracção das matérias-primas

4.1.1 Britador primário

O primeiro equipamento das linhas de cimento da fábrica Cibra é o britador primário de martelos COMETNA® (Companhia Metalúrgica Nacional), representado na Fig. 4.1, que tem capacidade de britagem de cerca de 300 t/h.

Os britadores de martelos utilizam forças de impacto sendo muito utilizados na indústria cimenteira quer para calcários duros e de dureza média quer para argilas. O grau de fragmentação é de 40 a 60:1 o que permite fazer a britagem numa só fase. Este tipo de britadores obtém produções que podem ultrapassar as 2000 t/h.

A britagem, como se representa esquematicamente na Fig. 4.2, ocorre sucessivamente por:

1. Impacto dos martelos em rotação;
2. Compressão de encontro à placa de entrada;
3. Compressão contra as barras da grelha de saída.



Fig. 4.1 – Britador primário de martelos

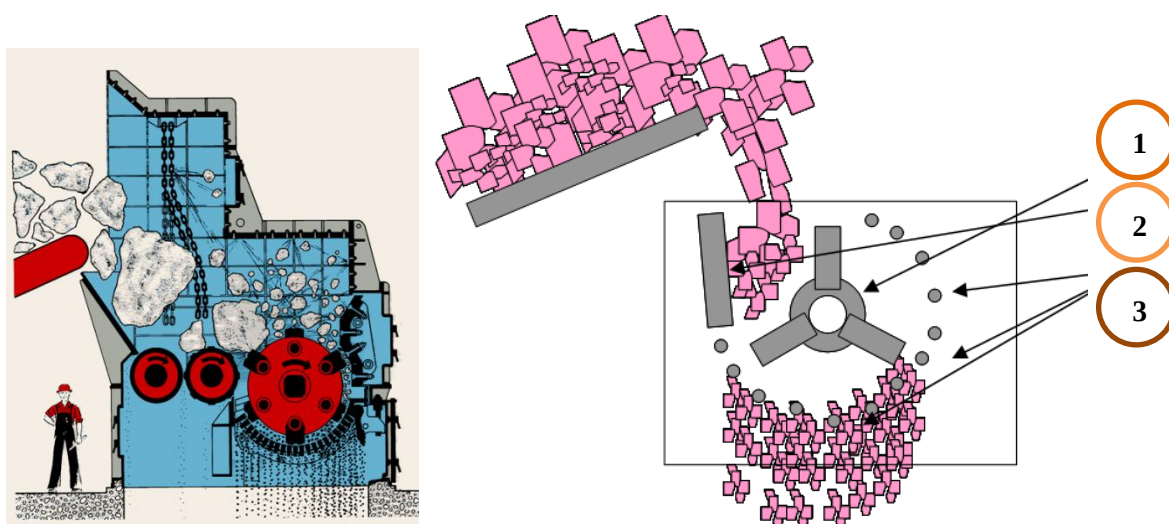


Fig. 4.2 – Representação esquemática do funcionamento de um britador de martelos

O formato dos martelos desempenha um papel significativo na eficiência do britador pois são eles que fazem a maior parte do trabalho de fragmentação. No fabrico dos primeiros martelos apenas se tinha em consideração a sua massa, hoje têm-se em consideração uma série de factores, nomeadamente:

- A localização do centro de gravidade do martelo

O centro de gravidade determina o ponto de impacto e deve ser controlado para que se utilize a totalidade da massa do martelo contra o material a moer.

- A trajetória do ar criada pela rotação dos martelos

Esta trajetória contém, normalmente, uma quantidade grande de finos que devem ser direccionados para longe das hastes dos martelos e do rotor a fim de evitar desgastes prematuros.

- A configuração das arestas da cabeça do martelo

Os martelos devem ser desenhados com uma geometria tal que o atrito seja o mínimo possível e assim se aumente a sua vida útil.

- Tratamento térmico

A dureza do martelo é um dos factores essenciais na determinação da sua vida útil. Enquanto a cabeça do martelo deve ser extremamente dura e resistente ao desgaste, a haste deve ser mais dúctil de modo a absorver os choques. A variação da dureza entre a haste e a cabeça do martelo deve ser gradual, sem mudanças bruscas.

Algumas das características dos martelos fabricados pela Magotteaux®, para britadores de martelos a utilizar em pedreiras e reciclagem de resíduos de demolição e construção são as seguintes:

- *Especificação técnica:*
 - Martelos de aço-manganês – dureza: 210 a 250 HB;
 - Aço martensítico (com menos de 2% de carbono) – dureza: 36 a 56 HRC;
 - Bimetal – dureza: 57 a 62 HRC.
- *Benefícios principais:*
 - Martelos de aço-manganês: Solução óptima em caso de impactos extremos;
 - Aço martensítico: excelente resistência ao impacto e fractura/ vida útil máxima e alta resistência ao cinzelamento (saltar lascas);
 - Bimetal: excelente resistência mecânica e aumento de dureza.

Os martelos têm formatos diferentes, conforme mostra a Fig. 4.3, dependendo do fabricante e do modelo do britador.

Os martelos bimetalicos são essencialmente utilizados para calcário e clínquer. Estes martelos fundidos combinam as vantagens de dois tipos de metais diferentes, cada um com as suas vantagens, tal como facilidade de soldadura e, muito especialmente, uma alta resistência ao desgaste.

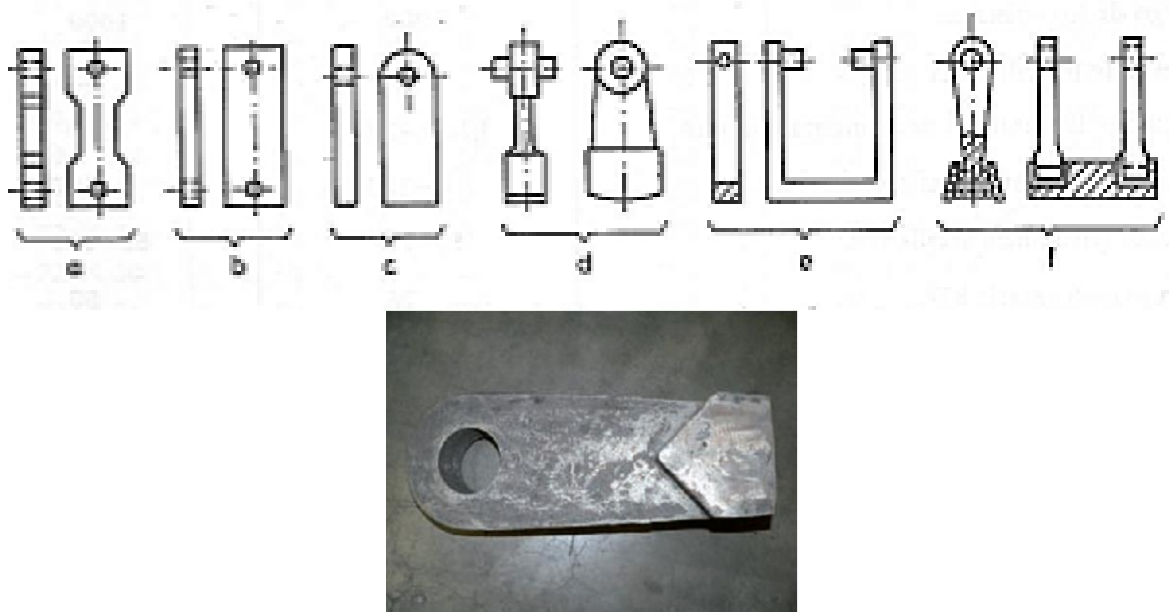


Fig. 4.3 – Diversos formatos de martelos (em cima) e martelo bimetálico (em baixo)

Para o controlo da granulometria de saída é determinante a distância entre as barras da grelha de saída e a distância da grelha aos martelos. Quando os martelos se gastam é necessário ajustar aquela distância de modo a manter a granulometria máxima do material britado, o que pode ser feito pela parte exterior.

Os martelos têm tendência a gastarem-se mais de um lado pelo que é normal, ao fim de um determinado desgaste, virá-los.

As grelhas, apresentadas na Fig. 4.4, em aço-manganês, e as placas de revestimento da cavidade de britagem devem ser substituídas quando o desgaste é elevado.



Fig. 4.4 – Grelhas do britador

Alguns britadores têm, na entrada, uma cortina de correntes para prevenir que alguns pedaços de material, quando britados, saiam projectados para fora do britador.

4.2 Preparação das Matérias-Primas

4.2.1 Transporte

O material, após a britagem, apresenta-se com granulometria adequada para posterior utilização nas fases seguintes do fabrico.

O transporte da matéria-prima principal (calcário branco) desde a pedreira de Alva em Pataias até à fábrica é feito mediante telas transportadoras de borracha, representadas na Fig. 4.5, com uma extensão de cerca de 2000 metros.



Fig. 4.5 – Telas transportadoras

Este tipo de transporte requer, acima de tudo, inspecções cuidadas e periódicas para verificar que: todos os roletes que sustentam a tela estão a rodar; os raspadores das telas estão em bom estado de conservação; a tela tem o tensionamento correcto; o tambor mandante tem o revestimento em borracha vulcanizada em bom estado (permitindo o movimento “rotativo” da tela contínuo e sem vibrações); o perfil dos tambores permanece com ligeira forma de barril para que a tela permaneça centrada nos tambores e não os abandone; o accionamento (conjunto motor e redutor) não apresenta fugas de óleo lubrificante, vibração e aquecimento excessivos.

4.2.2 Armazenamento

Numa fábrica de cimento é necessário prever uma armazenagem de grandes quantidades de matérias-primas para evitar perdas de produção e garantir trabalho em regime contínuo. Essa armazenagem pode ser combinada com uma função de pré-homogeneização.

O armazenamento e homogeneização do calcário branco são feitos em três silos metálicos verticais, como mostra a Fig. 4.6.



Fig. 4.6 – Silos de armazenamento de calcário branco: exterior (à esquerda) e base (à direita)

Cada silo tem na parte inferior, doseadoras como as representadas na Fig. 4.7. Estas doseadoras são dotadas de esteira metálica para suportarem as elevadas cargas associadas ao peso da coluna de matérias-primas a que estão sujeitos.



Fig. 4.7 – Doseadoras de calcário branco

A manutenção deste tipo de equipamentos compreende a inspecção do carril e das rodas que nele se deslocam, do accionamento e do estado da esteira metálica. Se necessários estes elementos são reparados ou substituídos.

4.2.3 Matérias-primas secundárias

No fabrico de cimento branco são utilizadas outras matérias-primas denominadas secundárias, tais como natas de mármore provenientes da serração de mármore, areia branca, areia comum, caulino (silicato de alumínio) e calcário rico (calcário com elevado teor de óxido de cálcio e baixíssimo teor de óxido de ferro).

Cada tipo de matéria-prima tem uma forma de introdução no processo própria e adequada às suas características:

- As natas de mármore são enviadas através de uma tela transportadora para uma tremonha que doseia a quantidade transportada para um desagregador através da velocidade de rotação de uma esteira metálica, conforme ilustra a Fig. 4.8. Este desagregador é constituído por facas de freze agrícola e tem como principal função britar os torrões que surgem devido ao facto deste material ser fortemente higroscópico. O mármore britado é descarregado numa tela que alimenta uma balança doseadora, representada na Fig. 4.9.



Fig. 4.8 – Preparação das natas de mármore (à esquerda) e esteira e desagregador (à direita)



Fig. 4.9 – Balança doseadora de natas de mármore

- A areia branca, armazenada num silo metálico vertical como mostra a Fig. 4.10, não alimenta o moinho de cru devido ao facto de ser extremamente fina e abrasiva, mas sim o elevador de saída deste (elevador de produto acabado). Desta forma evita-se o desperdício de energia de moagem e evita-se o incremento de desgaste das placas e carga moente do moinho.



Fig. 4.10 – Silo de areia branca

- A areia comum, o caulino e o calcário rico, armazenados em tremonhas de betão, são doseados por balanças análogas à balança de natas de mármore. A Fig. 4.11 mostra a balança doseadora de caulino.



Fig. 4.11 – Balança doseadora de caulino

4.2.4 Moagem de cru

As matérias-primas principal e secundárias são transportadas por uma tela dupla, como mostra a Fig. 4.12. A tela inferior transporta directamente as natas de mármore, o caulino e a areia comum para o moinho de bolas de cru, por estas terem granulometria adequada à alimentação directa do moinho, enquanto que o calcários branco e rico transportados na tela superior alimentam um britador secador a montante do moinho.

Este britador, representado na Fig. 4.13, recebe uma parte dos gases quentes do forno tendo como funções secar e britar os materiais para dimensões adequadas à moagem de cru. O calor contido nos gases de escape dos fornos é aproveitado para secar as matérias-primas e simultaneamente para transporte do cru do moinho ao silo de armazenagem. As tarefas de manutenção deste britador são semelhantes às efectuadas no britador da pedreira, compreendendo verificação e caso necessário reparação ou substituição do accionamento, das placas de impacto e dos martelos do corpo do britador. As matérias-primas alimentam o moinho de cru por um dos extremos.

O moinho de cru, representado na Fig. 4.14, é um moinho tubular horizontal de duas câmaras onde são depositados corpos moentes, isto é, bolas metálicas de diversos diâmetros. O moinho recebe parte dos gases de combustão do forno e a sua rotação provoca na primeira câmara o impacto das bolas de aço, com diâmetros compreendidos entre 60 e 90 mm, com a mistura. Na segunda câmara, as bolas com diâmetros entre 15 e os 30 mm, reduzem sucessivamente a granulometria por efeito do atrito entre si e o material.

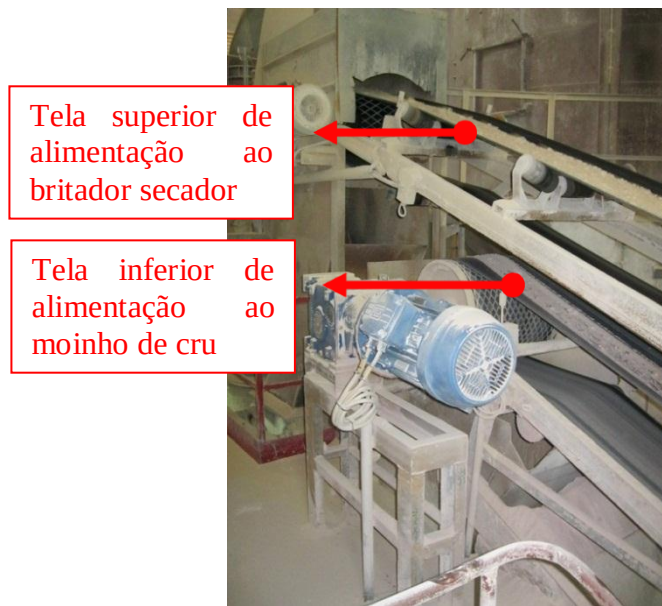


Fig. 4.12 – Alimentação das matérias-primas à moagem de cru



Fig. 4.13 – Britador secador da moagem de cru

A manutenção de moinhos de bolas envolve, por um lado, a verificação do estado do accionamento no que respeita a excesso de vibrações e temperatura e a fugas de óleo lubrificante, e por outro, a substituição de bolas desgastadas e de placas de revestimento interno do moinho que sofrem desgaste devido ao impacto e atrito das bolas na sua superfície.

O cru e gases que saem pelo extremo oposto do moinho alimentam o elevador de baldes que eleva o cru a um separador.



Fig. 4.14 – Moinho de cru

O elevador de baldes, representado na Fig. 4.15, é um transportador de corrente dupla que trabalha na vertical e tem fixos baldes.

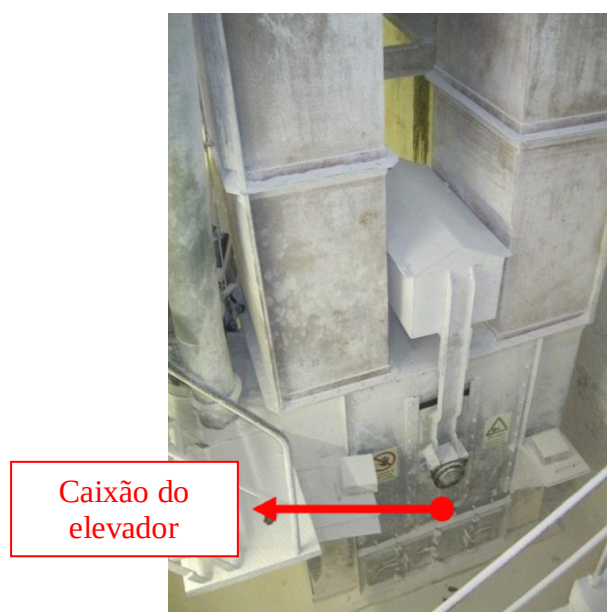


Fig. 4.15 – Elevador de saída do moinho de cru

Na parte superior tem o accionamento com as rodas mandantes (semelhantes a carretos) e na parte inferior as rodas mandadas. A rotação da corrente provoca o enchimento dos baldes aquando da passagem destes pelo caixão do elevador. Os baldes, por sua vez, descarregam o cru no separador.

O separador, representado na Fig. 4.16, tem um corpo cônico e, mediante a turbulência provocada pelo fluxo de gases de combustão no seu interior, faz a separação entre os materiais finos e os grossos.



Fig. 4.16 – Separador da moagem de cru

Os grossos precipitam para a base do separador voltando a alimentar o moinho de cru, sendo moídos até à dimensão pretendida. Os finos, por sua vez, saem pela parte superior do ciclone e seguem para os silos de armazenamento e homogeneização de cru, representados em Fig. 4.17.

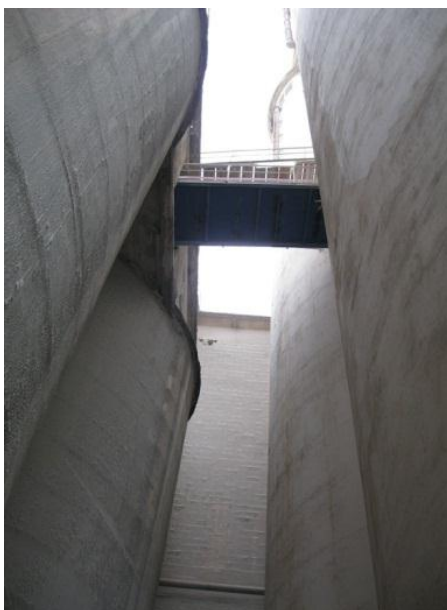


Fig. 4.17 – Silos de cru

4.3 Processo de Clinquerização

Por forma a esclarecer com maior clareza esta fase importantíssima do processo, ilustra-se na Fig. 4.18 o sinóptico do forno de branco com os principais equipamentos e parâmetros de controlo.

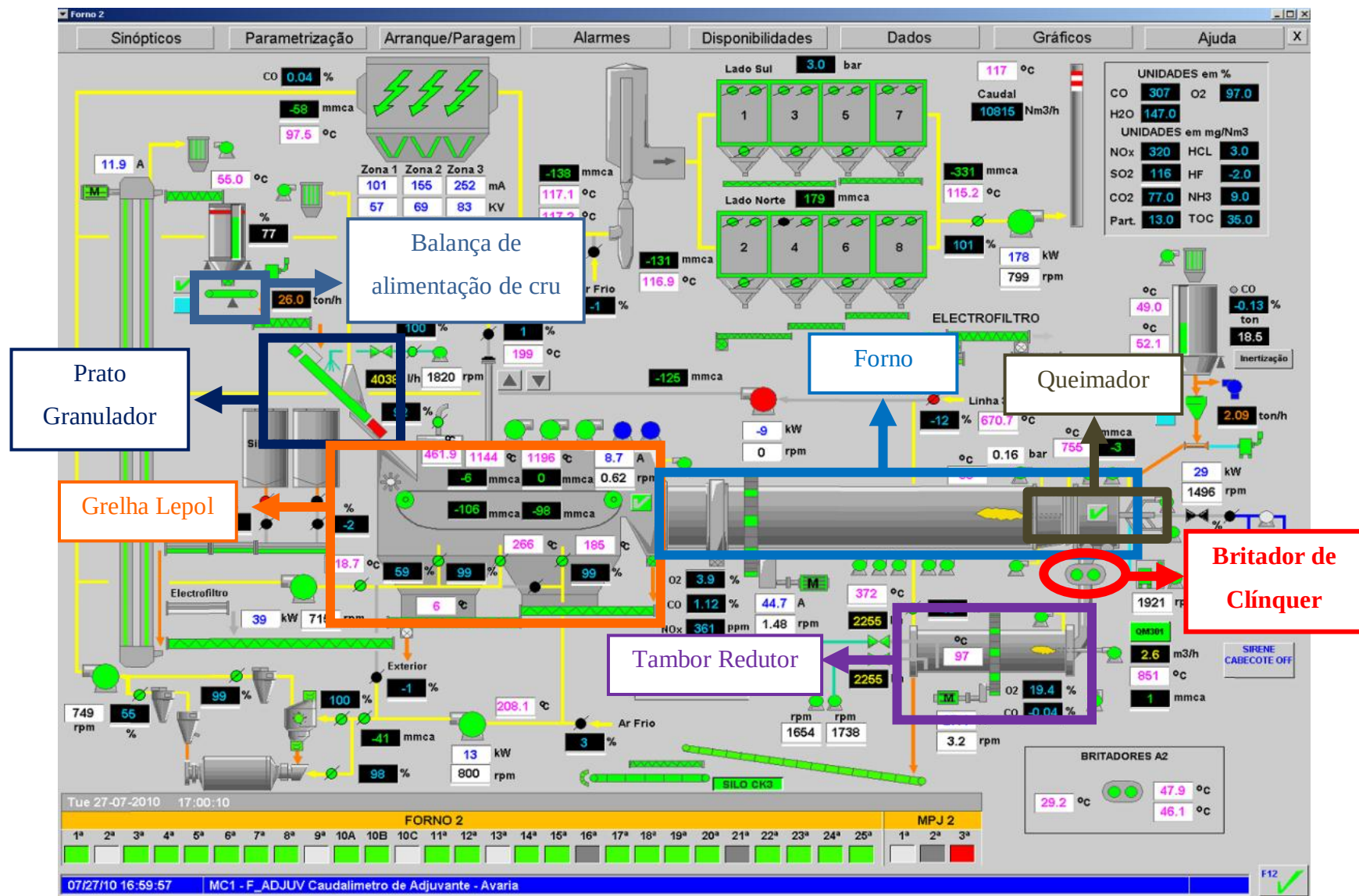


Fig. 4.18 – Sinóptico do forno de branco

4.3.1 Balança de alimentação de cru

A balança doseadora HASLER® com capacidade de doseamento de 30 t/h de cru (na forma de tapete consoante ilustra a Fig. 4.19) deposita-o num transportador sem-fim (por parafuso sem-fim) que, por sua vez, alimenta o prato granulador de cru previamente homogeneizada nos silos de cru.

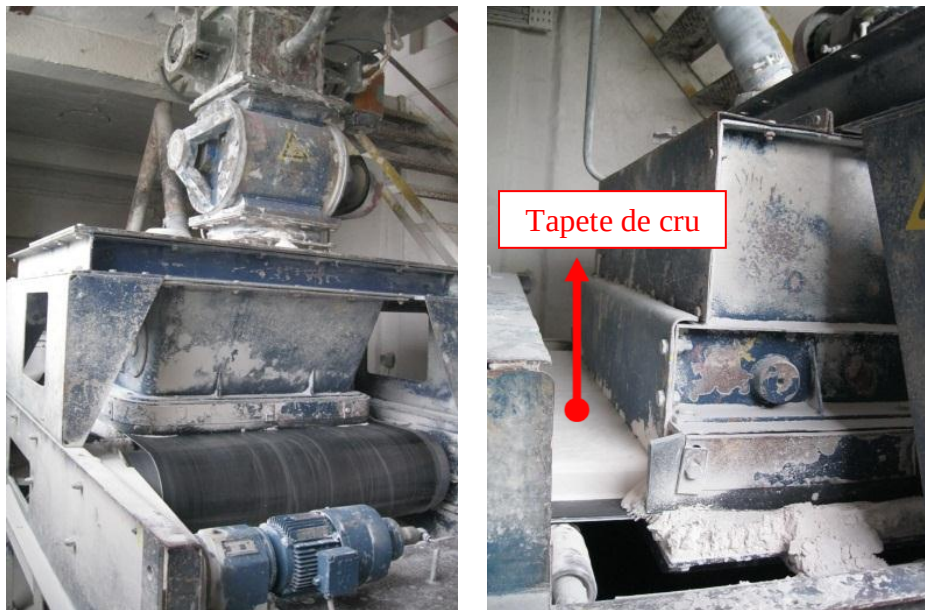


Fig. 4.19 – Balança doseadora de cru (à esquerda) e pormenor do tapete de cru (à direita)

4.3.2 Prato granulador

O facto do cru branco ser muito fino e ter uma adesividade bastante elevada não permite que o aquecimento e descarbonatação iniciais sejam feitos facilmente numa torre de ciclones, pois se tal acontecesse os ciclones seriam vítimas de entupimentos constantes e o processo de perda de rendimento. Assim, o aquecimento e descarbonatação iniciais são efectuados num pré-aquecedor com grelhas designado por grelha Lepol. A alimentação do cru a uma grelha Lepol carece de preparação, sendo que deve estar sob a forma de grânulos que permitam a sua evolução ao longo da grelha.

A função do prato granulador (Fig. 4.20) é, portanto, mediante a sua rotação associada à pulverização de cerca de 4,2 m³/h de água provocar a formação de pequenos grânulos com cerca de 1 a 2 cm de diâmetro.



Fig. 4.20 – Prato granulador (à esquerda) e grânulos formados (à direita)

4.3.3 Grelha Lepol

Como foi referido anteriormente, a grelha Lepol, representada na Fig. 4.21, é responsável pelo aquecimento e descarbonatação parcial dos grânulos de cru. A grelha funciona como uma tela de transporte com grelhas e apresenta duas câmaras. Na segunda câmara da grelha os gases que saem do forno (a cerca de 1100°C) atravessam a camada de grânulos provocando a sua descarbonatação parcial. Seguidamente, estes gases já arrefecidos a temperaturas da ordem dos 400°C (por permuta térmica com os grânulos) passam pela primeira câmara provocando secagem e aquecimento dos grânulos. Este pré-aquecedor tem grelhas metálicas capazes de suportar as altas temperaturas e permitir que sejam atravessadas pelos gases.



Fig. 4.21 – Grelha Lepol (à esquerda) e grelha (à direita)

Pelas elevadas temperaturas de serviço e pelo facto de operar com material semi-húmido, a grelha Lepol é altamente consumidora de material de substituição (consumíveis e sobressalentes). Frequentemente, acumula-se uma cortina de grânulos na zona das placas de bordo que aí permanece estática e, devido ao sucessivo aquecimento do material, queima as placas de bordo e as grelhas adjacentes (representadas na Fig. 4.22) e os veios que as sustentam, tornando necessário proceder à substituição destes elementos feitos em liga de fundição, tarefa morosa e dispendiosa.



Fig. 4.22 – Interior da grelha Lepol

4.3.4 Forno

Após atravessar a grelha, o cru é cozido num forno (Fig. 4.23) constituído por um tubo rotativo com diâmetro de 3200 mm, comprimento de 36 m, montado segundo uma inclinação de 3,5% e com uma velocidade de rotação máxima de 1,5 rpm.



Fig. 4.23 – Forno de branco

Interiormente o forno é revestido de material refractário que lhe confere protecção e reduz as perdas térmicas como mostra a Fig. 4.24.



Fig. 4.24 – Aplicação de tijolo refractário no interior do forno

O tijolo refractário do forno é o principal elemento decisor da paragem anual de um forno. Pelo facto do tijolo ter uma vida útil de aproximadamente um ano, este indica, através da evolução do seu desgaste, a necessidade de paragem para revisão anual, sob pena de se danificar profundamente o casco do forno através do seu empeno.

4.3.5 Queimador

O queimador é o equipamento responsável pela introdução no forno e queima do combustível utilizado no fabrico do clínquer branco (coque de petróleo). O queimador apresenta diversos canais, como mostra a Fig. 4.25, com características próprias: um tubo central que transporta o combustível; um tubo concêntrico de maior diâmetro que alimenta a chama com ar principal (ar atmosférico introduzido por um ventilador) responsável pela oxidação da chama; um tubo que envolve os anteriores, tendo na sua extremidade uma ponteira dotada de alhetas criteriosamente inclinadas que introduzem o designado ar secundário, responsável pela modelação da forma da chama através do vórtice gerado. O queimador é revestido exteriormente com betão refractário capaz de suportar as elevadas temperaturas a que está sujeito.



Fig. 4.25 – Queimador do forno de branco

4.3.6 Britador de clínquer

Na saída do forno encontra-se o britador de clínquer. Este equipamento será analisado detalhadamente no capítulo seguinte pelo que, nesta fase, importa apenas referir que a sua principal função é britar os aglomerados que se formam no interior do forno. Com a operação de britagem é obtido clínquer com uma maior superfície específica e menor dimensão que permite a completa redução e um arrefecimento mais rápido no tambor redutor.

4.3.7 Tambor redutor

O tambor redutor, representado na Fig. 4.26, analogamente a um forno, tem a forma tubular e é revestido internamente por tijolo refractário.

Por forma a desempenhar duas funções distintas o tambor redutor tem duas câmaras distintas. A primeira câmara recebe o clínquer britado e reduz os óxidos presentes no clínquer, nomeadamente o óxido de ferro, através de uma chama redutora (obtida pela queima de GPL com carência de oxigénio). Pretende-se com este procedimento eliminar a presença de óxidos metálicos que poderão provocar alterações à coloração branca pretendida.

O clínquer evolui no tambor redutor passando para a segunda câmara através de uma abertura na parede divisória das câmaras, onde é arrefecido por água nebulizada para uma temperatura que permita o seu transporte e armazenamento (cerca de 100°C). Na região de arrefecimento estão montados dois raspadores para evitar que o clínquer arrefecido se acumule naquela zona.

O forno é sempre complementado por um sistema de arrefecimento do produto fabricado, porque a evacuação e o transporte do clínquer incandescente são, na prática, impossíveis. Adicionalmente, o arrefecimento rápido melhora a qualidade do clínquer.

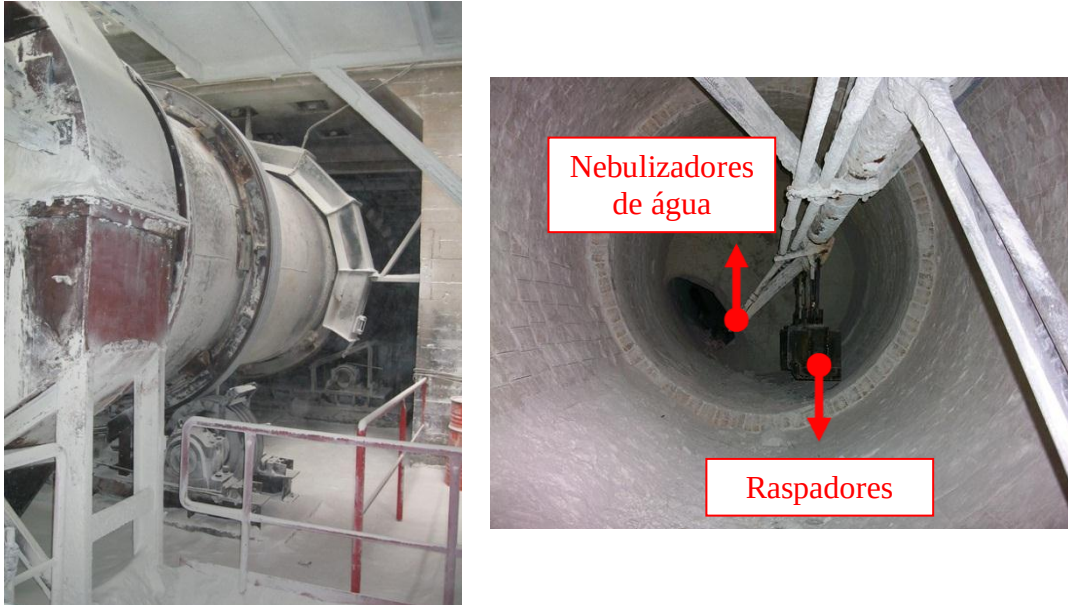


Fig. 4.26 – Exterior do tambor redutor (à esquerda) e segunda câmara (à direita)

4.4 Moagem de cimento

4.4.1 Transporte metálico

À saída do tambor redutor encontra-se o transporte metálico, representado na Fig. 4.27, que transporta o clínquer até ao elevador de clínquer.

As principais acções de manutenção executadas neste transporte compreendem a inspecção do accionamento, do carril, das rodas e do estado dos baldes e, caso necessário, a substituição destas peças.



Fig. 4.27 – Transporte metálico (à esquerda) e clínquer à saída do tambor redutor (à direita)

4.4.2 Elevador de clínquer

O elevador de clínquer, apresentado na Fig. 4.28, é um elevador de baldes, análogo ao elevador de saída do moinho de cru, cuja função é introduzir o clínquer nos silos de clínquer, idênticos ao de cru.



Fig. 4.28 – Elevador de clínquer

4.4.3 Moinho de cimento

O processo que envolve a moagem de cimento é muito semelhante ao trajecto feito pela moagem de cru. O cimento resulta da moagem fina de vários componentes, sendo o componente maioritário o clínquer, ao qual se juntam gesso e aditivos em quantidades previamente especificadas e garantidas para o bom produto final.

As formas de gesso de moldes são previamente britadas sendo que o gesso alimenta uma balança doseadora própria à entrada do moinho, representada na Fig. 4.29.



Fig. 4.29 – Formas de gesso (à esquerda) e balança doseadora de gesso (à direita)

O moinho de cimento branco, apresentado na Fig. 4.30, é um moinho de câmara única que funciona em circuito fechado, isto é, a jusante do moinho existem separadores (semelhantes ao separador de cru) que rejeitam as partículas mais grossas retornando ao circuito de moagem. O cimento produzido é normalmente transportado por via pneumática e armazenado em silos verticais.



Fig. 4.30 – Moinho de cimento branco

4.5 Embalagem de Cimento

4.5.1 Ensacadeira de cimento branco

O cimento armazenado nos silos alimenta a ensacadeira de cimento branco, representada na Fig. 4.31, com oito bicas de enchimento que tem capacidade para produzir 1680 sacos de 25 kg por hora e 1920 sacos de 40 kg por hora.



Fig. 4.31 – Ensacadeira de cimento branco (à esquerda) e bica de enchimento (à direita)

4.5.2 Paletizadora

Os sacos cheios passam por telas transportadoras e alimentam a paletizadora, (Fig. 4.32) que tem capacidade de produção de 24 paletes por hora de sacos de 25 kg e 45 paletes por hora de sacos de 40 kg.



Fig. 4.32 – Formação da camada (à esquerda) e formação da paleta (à direita)

5 Britador de Clínquer Branco

Este capítulo aborda os conceitos necessários à compreensão do trabalho desenvolvido neste equipamento da linha de produção de cimento branco, introduzindo este tipo de britador, descrevendo os componentes do britador de clínquer branco, enquadrando o britador de clínquer branco na respectiva linha de produção e descrevendo o seu princípio de funcionamento, condições de operação e problemas verificados.

5.1 Britador de rolos

O britador de clínquer branco pertence à família de britadores de rolos. Este tipo de britadores utiliza forças de compressão no processo de fragmentação e pode ser simples ou de rolos duplos, conforme ilustra a Fig. 5.1.

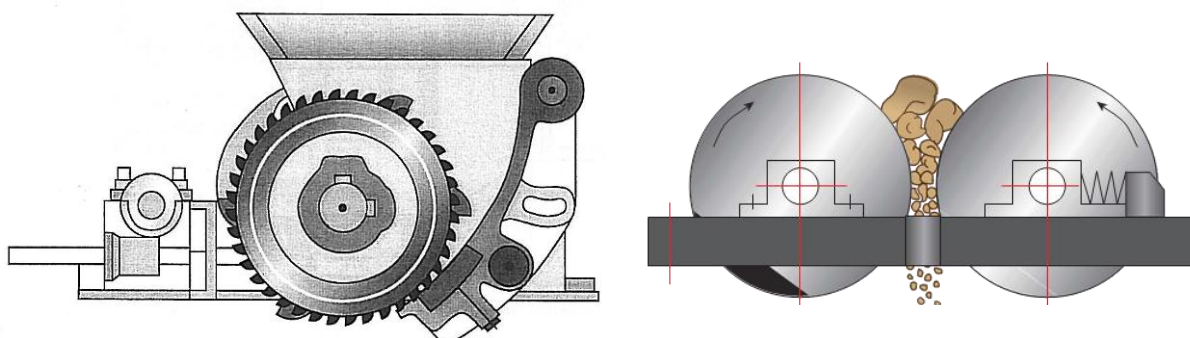


Fig. 5.1 – Britador de rolos simples (à esquerda) e britador de rolos duplos (à direita)

Nos britadores de rolos duplos estes rodam em sentidos contrários e são normalmente utilizados para materiais medianamente duros e abrasivos.

No caso de materiais húmidos, tal como argilas e margas, devem utilizar-se rolos com “dentes”. Os britadores de rolos dentados apresentam velocidades periféricas muito baixas, 1 a 2 m/s e admitem material com uma granulometria máxima de 500 mm. Estes são os britadores ideais para materiais muito “aderentes”, como é o caso do clínquer branco.

Nos britadores de rolos (Fig. 5.2) um dos rolos é fixo e o outro móvel e o intervalo entre os rolos pode ser ajustado de acordo com a granulometria que se pretende obter. No caso do modelo abaixo existem raspadores, em ambos os rolos, para retirar o material que tenda a aderir nas extremidades dos rolos.

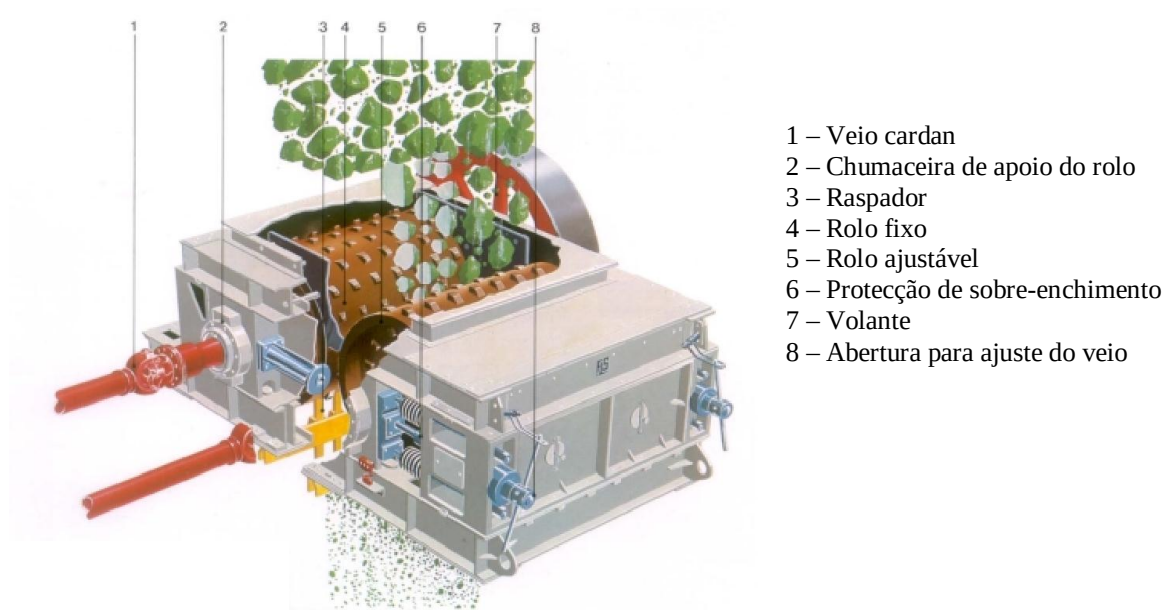


Fig. 5.2 – Britador de rolos

5.2 Componentes do britador de clínquer branco

O equipamento **britador de clínquer branco** é composto por diversas peças, cujas funções das principais se descrevem seguidamente. Os desenhos de construção de cada uma das peças encontram-se em *Anexos*.

5.2.1 Aro de ligação ao cabeçote

Este aro metálico (Des. 21.149 em *Anexos*), representado na Fig. 5.3, funciona como elemento de ligação entre o *funil superior* e o cabeçote do forno garantindo a estanquidade entre estes.



Fig. 5.3 – Aro de ligação ao cabeçote

O cabeçote, representado na Fig. 5.4 tem como principais funções: garantir a estanquidade do forno evitando a entrada e saída de clínquer e ar e permitindo a rotação livre do forno; sustentar o queimador, no qual passam o combustível (coque de petróleo) e o comburente (ar atmosférico); descarregar o clínquer produzido, mediante uma abertura existente na parte inferior do cabeçote, sobre os *rolos de compressão* do britador de clínquer.



Fig. 5.4 – Cabeçote do forno e queimador

5.2.2 Funil superior

O funil superior (Des. 21.131.100 em *Anexos*) orienta a descarga do clínquer (proveniente do forno) para os *rolos de compressão*. Esta peça é revestida por tijolo refractário Refracta® R2000 devidamente fixo à caída por intermédio de parafusos. Estes parafusos (M16×110 mm) servem como elemento de fixação dos tijolos refractários ao funil superior. Por serem produzidos em aço EN X 15 CrNiSi 25 20 (W. Nr. 1.4841) apresentam características para serviços permanentemente em alta temperatura, pois o seu elevado teor de cromo e níquel conferem-lhe excelente resistência a diversos agentes corrosivos, bem como boas características mecânicas a temperaturas elevadas.

Para que se consigam fixar os tijolos à caída, estes são furados ao centro com brocas.

A composição química do tijolo refractário apresenta-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Composição química do tijolo Refracta R2000

Composição química do tijolo Refracta R2000	
SiO ₂	30-35
Al ₂ O ₃	38-43
Fe ₂ O ₃	0,5-1,0
SiC	25-29

5.2.3 Tampa superior

A tampa superior (Des. 21.133 em *Anexos*) do britador delimita a parte superior do britador (antes da britagem do clínquer) servindo de elemento de fixação da *protecção interior dos rolos*. A tampa superior é revestida interiormente com o betão refractário Refracta® PF-97-H de composição química igual e propriedades químicas, térmicas e mecânicas semelhantes ao tijolo anteriormente referido.

Na Fig. 5.5 identificam-se o funil superior e a tampa superior.

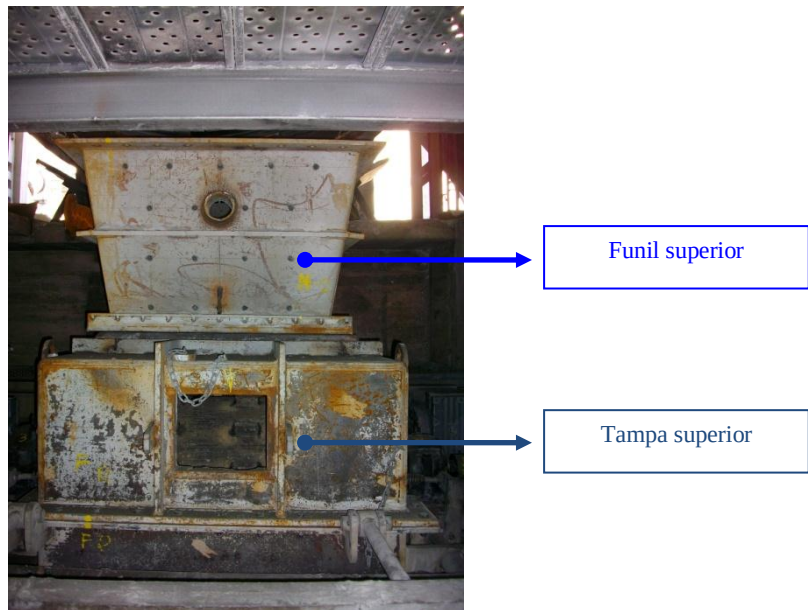


Fig. 5.5 – Funil superior e tampa superior

5.2.4 Protecção dos veios dos rolos

Esta peça (Des. 21.147 em *Anexos*) orienta o clínquer para a zona de britagem entre os dois *rolos de compressão* protegendo os veios dos rolos da acção térmica e abrasiva do clínquer. Analogamente ao *funil superior* esta peça é também revestida com o mesmo tijolo refractário. A Fig. 5.6 mostra a peça sem revestimento.



Fig. 5.6 – Protecção dos veios dos rolos

5.2.5 Veios

Os veios (Des. 21.078.100 em *Anexos*) são furados internamente e têm como funções suportar e promover o arrefecimento de si mesmos e dos *rolos de compressão*. Os veios são construídos em aço EN 34 CrNiMo 6 (W. Nr. 1.6582) que apresenta elevada resistência à fadiga e ao desgaste e elevado limite elástico.

O arrefecimento do veio e respectivo rolo é efectuado através da entrada de água por uma extremidade do veio que escoa para o interior do rolo através de dois furos com 50 mm de diâmetro, existentes no veio. Após atravessar a espiral no interior do rolo, a água sai por outros dois furos de igual dimensão aos anteriormente descritos pelo extremo oposto da entrada de água.

A Fig. 5.7 ilustra, em corte, o veio e os furos existentes.

5.2.6 Rolo de compressão

O britador de clínquer branco é constituído por dois rolos de compressão dentados com uma espiral oca interna (Des. 21.089 em *Anexos*), cada um deles montado num veio furado internamente.

Um dos rolos é fixo e o outro é ajustável e móvel correspondendo à distância entre ambos a granulometria máxima do clínquer. Um dos rolos é ajustável pois permite regulação da distância entre rolos (aquando da montagem) e móvel, uma vez que, no caso de os rolos não terem capacidade de britar um aglomerado de clínquer, este rolo permite um ligeiro acréscimo da distância entre rolos (definido pela constante de uma mola helicoidal) para evitar a falha mecânica do equipamento.

A Fig. 5.7 mostra a montagem e interior do rolo no veio.

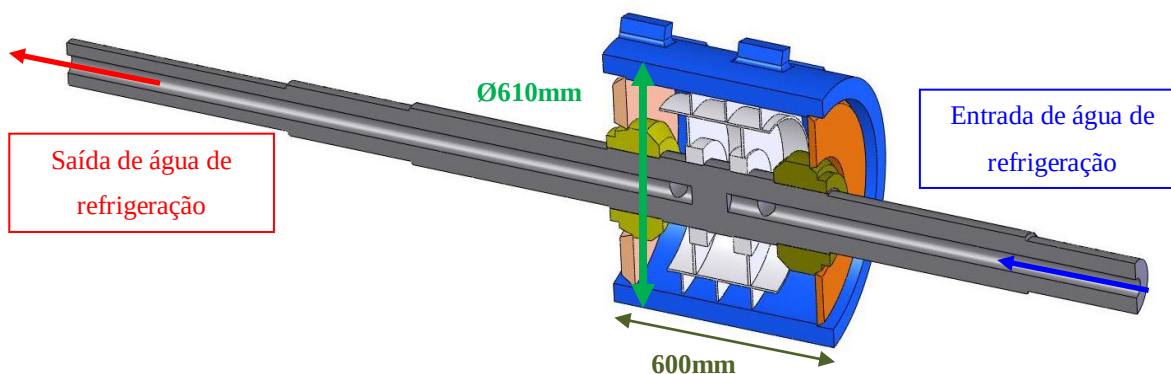


Fig. 5.7 – Montagem de um rolo de compressão no veio

5.2.7 Vedação entre funil superior e a tampa superior

Tal como o nome indica este elemento (Fig. 5.8) garante a vedação entre o *funil superior* e a *tampa superior*, assegurando a estanquidade do conjunto. Esta peça (Des. 21.151 em *Anexos*) é revestida internamente por tijolo refractário Refracta R2000 fixo com parafusos.



Fig. 5.8 – Vedação entre funil superior e tampa superior

5.2.8 Tampa inferior

A tampa inferior (Des. 21.132 em *Anexos*) orienta a descarga do clínquer britado para o interior do tambor redutor. Esta tampa é revestida interiormente com o betão refractário Refracta PF-97-H.

5.2.9 Funil inferior

O funil inferior (Des. 21.132 em *Anexos*) é a última peça do britador em contacto com o clínquer britado orientando-o para o interior do tambor redutor. O funil é revestido por tijolo refractário Refracta R2000 devidamente fixo à caída por intermédio de parafusos. A Fig. 5.9 mostra esta peça após serviço.



Fig. 5.9 – Funil inferior

5.2.10 Sistema de Accionamento

O accionamento de cada rolo é feito por um motor de corrente alternada trifásico de 11KW a 1460 rpm (Motor AC 3F 380v 11KW 1460rpm SEW), acoplado a um redutor com relação de transmissão 114,34 e 11KW (Redutor $i=114,34$ 11KW SEW SH127/G AM160). Assim, a velocidade de rotação à saída do redutor (velocidade de rotação do rolo) é de aproximadamente 13 rpm.

5.3 Condições de operação

Por se encontrar na saída do forno, imediatamente após o queimador, como ilustrado anteriormente na Fig. 4.18, recebe o clínquer branco a temperaturas de cerca de 1300-1400°C e, após britar os aglomerados, descarrega-os no tambor redutor cuja chama redutora atinge aproximadamente 1000 °C.

Em determinadas circunstâncias formam-se incrustações e grânulos de grandes dimensões, como mostra a Fig. 5.10 (por vezes com volume superior a $\frac{1}{2} \text{ m}^3$) como consequência de irregularidades pontuais da composição química da matéria-prima e/ou da condução do processo de cozedura.



Fig. 5.10 – Incrustações e grânulos no interior do forno de cimento branco

Antes de o clínquer ser descarregado do forno para o tambor redutor é necessário diminuir a sua dimensão mediante um britador: o **britador de clínquer branco**.

A principal função do britador de clínquer branco é portanto reduzir o clínquer para dimensões de grãos suficientemente pequenos, aumentando grandemente a superfície específica do clínquer o que possibilita a redução completa e o seu arrefecimento brusco no tambor redutor. Esta operação permite aumentar a eficiência da redução e do arrefecimento no interior do tambor redutor.

Além da função principal o britador de clínquer funciona ainda como meio isolador entre o forno e o tambor redutor impedindo que se verifique a passagem de ar entre estes.

Importa referir que qualquer paragem do britador de clínquer implicará uma paragem do forno e consequentemente da produção de clínquer branco.

Assim, pretende-se que o britador funcione durante, pelo menos, um ano sem qualquer intervenção curativa, sendo este tipo de manutenção executada aquando da manutenção anual planeada da linha de branco.

Qualquer paragem não planeada intermédia, acarreta, cerca de uma semana de paragem de toda a linha de produção, compreendendo:

- Um dia para arrefecimento do forno e britador de clínquer;
- Dois a três dias de reparação do britador ou substituição dos rolos;
- Um dia para aquecimento do forno e restabelecimento da linha nas condições normais de funcionamento.

5.4 Conceção do britador

Antes da concepção do britador de clínquer sabia-se previamente que o principal problema que condicionaria o seu correcto funcionamento seria a alta temperatura do clínquer.

Isto deve-se ao facto de só ser possível arrefecer o clínquer em atmosfera controlada (atmosfera redutora) no tambor redutor. Desta forma, a elevada temperatura do clínquer a que está submetido o britador é um problema com o qual se tem de lidar. Não sendo possível diminuir a temperatura do clínquer antes do britador, aquando da concepção foi estudada a forma de atenuar os seus efeitos mediante a selecção de materiais com capacidade de operação e resistência a elevadas temperaturas e procurando arrefecer os órgãos do britador.

Seguidamente descrevem-se as principais ideias que foram consideradas na concepção do britador:

- A superfície do rolo dentado seria revestida com eléctrodo de material refractário extremamente duro capaz de suportar o desgaste provocado por elevadas pressões de esmagamento, abrasão e elevadas temperaturas do clínquer.
- Os funis superior e inferior seriam, também eles, adequados a condições de trabalho a altas temperaturas sendo constituídos de tijolo refractário com um furo no centro para possibilitar a sua fixação por parafusos à estrutura do britador.
- Os veios de suporte dos rolos de impacto deveriam apresentar um furo interno no qual se transportaria água de arrefecimento. Esta água seria bombeada através do furo existente numa extremidade do veio, entrando no rolo e escoando-se pela espiral (arrefecendo quer o veio quer as paredes internas do rolo de compressão) e saindo pela extremidade oposta do veio.

Além do referido, o britador de clínquer branco foi montado com um ligeiro deslocamento relativamente ao centro do forno, tal como se mostra na Fig. 5.11, por forma a compensar o efeito da força centrífuga do clínquer à saída do forno rotativo. Assim, pretende-se que o clínquer seja imediatamente orientado para o centro dos rolos de compressão, maximizando o caudal britado e evitando entupimentos e material em espera no funil superior.

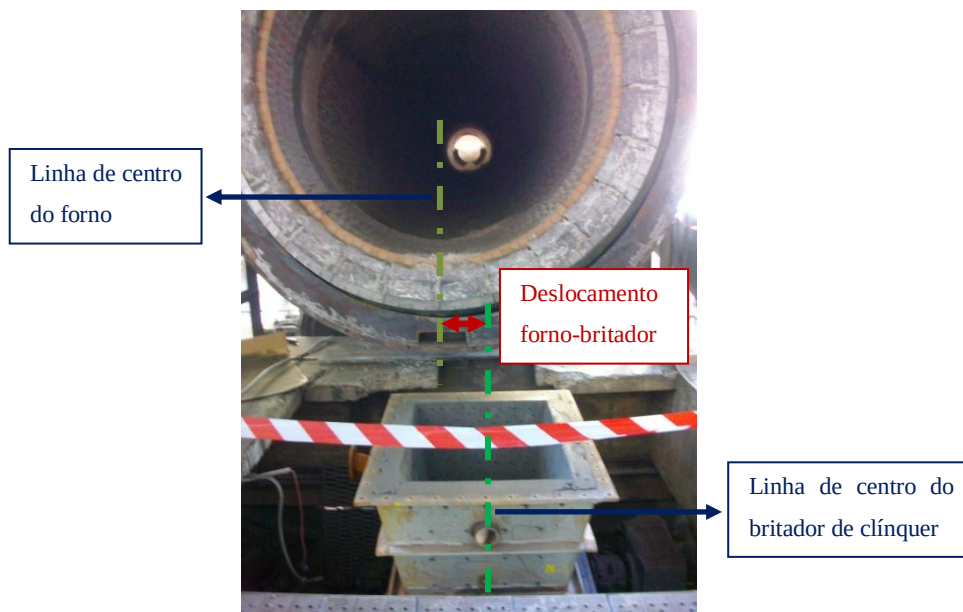


Fig. 5.11 – Posição do britador de clínquer relativamente ao forno

5.5 Problemas verificados após operação e suas causas

Apresentam-se, seguidamente, os principais problemas verificados nas diversas partes do britador e quais as suas possíveis origens:

- A. Os dentes do rolo de compressão apresentam um elevado desgaste por abrasão associado a alta temperatura podendo verificar-se o arrancamento do revestimento duro. Este fenómeno tem início nas arestas do dente e estende-se a toda a sua superfície consoante ilustram a Fig. 5.12 e a Fig. 5.13.



Fig. 5.12 – Arrancamento do revestimento nas arestas do dente



Fig. 5.13 – Arrancamento completo do revestimento na superfície do dente

Provavelmente este arrancamento deve-se à concentração de tensões decorrente do processo de soldadura em “arestas vivas”, o que, por si só, fragiliza o dente. A utilização do revestimento duro Castolin® EnDOtec DO*33 pode não ser a melhor opção pois, apesar de apresentar excelente capacidade de resistência à abrasão, tem pouca ductilidade e relativamente baixo coeficiente de dilatação térmica. Após o arrancamento do revestimento nas arestas do dente, este acontecimento evolui rapidamente em toda a extensão da superfície do dente, desprotegendo-o da elevada temperatura e desgaste.

Segundo Klimpel & Kik [2008] a composição química deste eléctrodo é a apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Composição química do eléctrodo Castolin DO*33

Composição química [%] do eléctrodo Castolin DO*33								
C	Si	Mn	Cr	Nb	B	P	S	Fe
2,5	0,8	2,0	13,0	5,0	2,2	0,02	0,01	Restante

O eléctrodo EnDOtec DO*33 é um eléctrodo contínuo especialmente utilizado contra a abrasão a elevada temperatura. Apresenta como principais características; a elevada dureza intrínseca do eléctrodo obtida no depósito, logo na primeira camada, de 68HRC; resistência à abrasão intensa a alta temperatura e à erosão em meio gasoso.

- B. A superfície do rolo apresenta fissuras em toda a sua extensão de revestimento (Fig. 5.14) resultantes do fenómeno de fissuração a frio, podendo, em algumas zonas, verificar-se a desunião do revestimento relativamente ao metal de base (Fig. 5.15).



Fig. 5.14 – Fenómeno de fissuração a frio na superfície do rolo de compressão

O fenómeno de fissuração a frio em soldadura ocorre quando coexistem em simultâneo os seguintes factores: hidrogénio no material depositado; elevado nível de tensões na junta e microestruturas duras e frágeis. A existência deste fenómeno indica que não houve uma correcta preparação da soldadura que inclui a secagem dos eléctrodos de soldadura, limpeza completa de gorduras e sujidade da superfície a soldar, utilização de gás de protecção de soldadura adequado e pré e pós-aquecimento dos rolos e dentes do britador.



Fig. 5.15 – Desunião do revestimento com o metal de base

Relativamente à desunião do revestimento com o metal de base, esta deve-se ao facto da altura do cordão de soldadura ter dimensão consideravelmente grande (cerca de 8 mm) comparativamente com a altura da zona fundida (2 mm), apresentando uma taxa de diluição de cerca de 20%. Desta forma o revestimento não está convenientemente fixo à superfície do rolo de compressão.

Note-se que, ao depositar um revestimento com características especiais para determinadas condições de operação (como o eléctrodo DO*33 com excelente resistência à abrasão), pretende-se obter a menor diluição possível para que as propriedades do revestimento fiquem intactas em grande parte da altura do cordão. Consequentemente, pode ocorrer o fenómeno de arrancamento deste revestimento devido à insuficiente ligação ao metal de base.

- C. Os tijolos refractários dos funis a montante e jusante dos rolos de impacto têm uma duração de cerca de um ano, contudo, apresentam alguma heterogeneidade na zona de encosto entre tijolos, o que acelera o seu desgaste. Além do exposto, estes são de difícil preparação pois necessitam de ser furados ao centro para que possam ser fixos com parafusos às estruturas dos funis.

A Fig. 5.16 apresenta em pormenor os tijolos refractários do funil a montante do britador com o furo central e respectivo parafuso (na parte interna do funil). A Fig. 5.17 mostra a grande quantidade de parafusos que é necessário desapertar e apertar para remoção dos tijolos danificados e fixação dos novos tijolos.

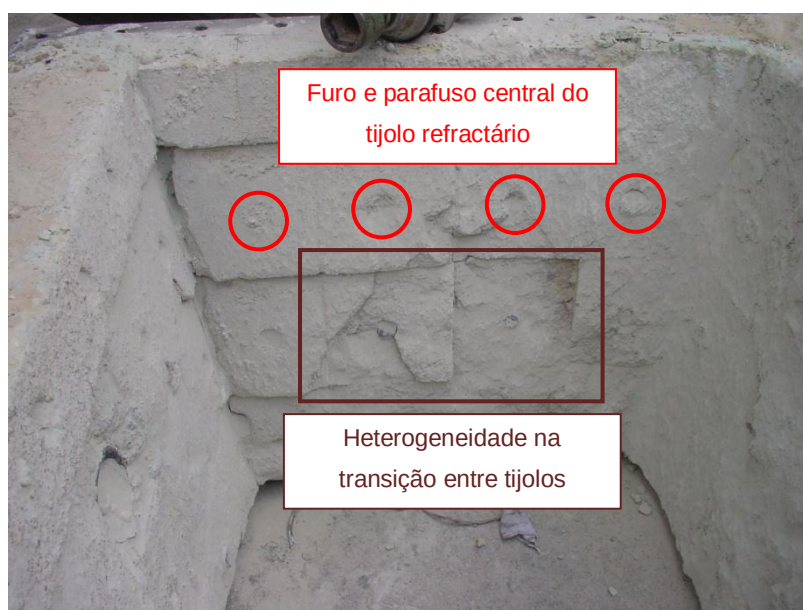


Fig. 5.16 – Heterogeneidade na transição entre tijolos

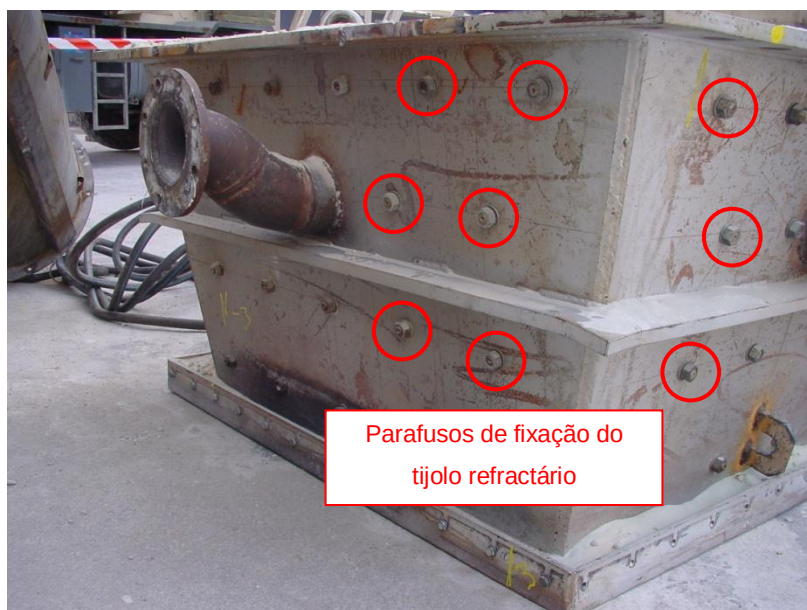


Fig. 5.17 – Parafusos de fixação do tijolo refractário

A substituição do tijolo acarreta elevado tempo, uma grande quantidade de consumíveis necessários à execução do furo central e de mão-de-obra (necessária para a remoção do tijolo deteriorado, furação e colocação do novo tijolo nas caídas). Durante a fixação dos tijolos ocorre, por vezes, a fractura do tijolo, encarecendo ainda mais esta tarefa.

D. O furo do veio do britador e a hélice interna, do lado do retorno da água de refrigeração apresentam bastante calcário depositado, conforme mostra a Fig. 5.18.

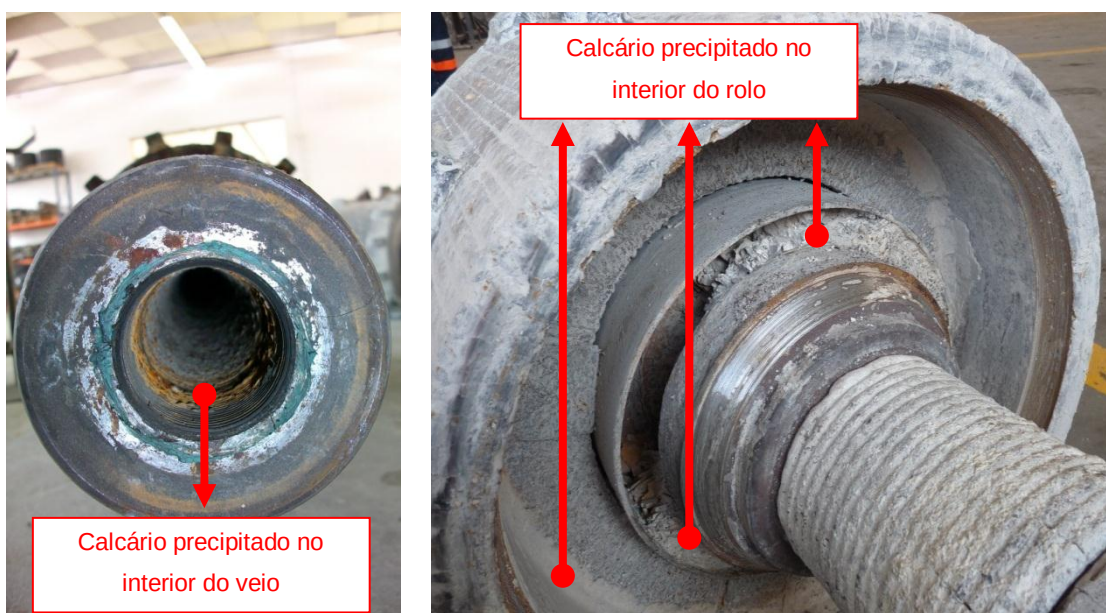


Fig. 5.18 – Precipitação de calcário no britador de clínquer

O calcário presente no lado do retorno indica que a água de refrigeração, após atravessar o interior do rolo, atingiu pelo menos 60°C, que é a temperatura de precipitação dos íons de cálcio (Ca^{2+}). Por vezes, a quantidade de calcário é tal que obstrui completamente o furo do veio do lado de retorno, provocando uma sobrepressão no interior do rolo e consequente rebentamento deste.

Além disso, o reaproveitamento das águas de retorno dos equipamentos para um depósito de alimentação associado à inexistência de um sistema de refrigeração provoca, ciclo após ciclo de arrefecimento, um aumento gradual da temperatura da água chegando esta a atingir os 40°C no depósito de alimentação. Para evitar o aquecimento progressivo da água é frequente escoar água de retorno do britador para o esgoto, uma vez que o britador é o principal consumidor de água da fábrica (consumindo 30 m³/h dos cerca de 80 m³/h de toda a fábrica, em plena laboração) e o principal “elemento aquecedor” (“aquecendo” água de alimentação de 20-30°C para 40-70°C).

Outro motivo que explica a existência de calcário no interior do rolo é o incorrecto funcionamento do sistema de descalcificação que não tem capacidade para a completa remoção dos íons responsáveis pela dureza da água.

6 Optimização do britador de clínquer branco

Importa recordar que uma simples substituição dos rolos de impacto, isto é, substituição dos rolos em serviço por rolos reparados, demora cerca de cinco dias. Para evitar que a linha de branco pare por um tempo superior ao referido tem-se em oficina um par extra de rolos previamente reparados. Desta forma evita-se um incremento do tempo de substituição uma vez que os rolos em serviço são reparados em oficina após novo arranque da linha.

Este capítulo aborda o trabalho desenvolvido no âmbito da optimização do britador de clínquer branco. Na primeira parte descrevem-se as modificações efectuadas ao nível do corpo do britador e na segunda expõe-se as alterações a efectuar ao nível do sistema de arrefecimento e descalcificação da água de arrefecimento

6.1 Alterações ao nível do corpo do britador

Ao nível do corpo do britador foram efectuadas diversas alterações que se explicam de seguida.

Inicialmente procedeu-se à remoção do revestimento deteriorado da superfície do rolo e dos dentes e limpam-se estas superfícies de todas as impurezas, nomeadamente gorduras, poeiras e óxidos, conforme se pode observar na Fig. 6.1.



Fig. 6.1 – Superfície do rolo após preparação

A tarefa de limpeza e preparação com eléctrodo de chanfro permitiu obter uma superfície com uma abertura que assegurasse um bom acesso à zona de trabalho, soldadura e posterior batimento dos cordões. Mediante o recurso ao ensaio de líquidos penetrantes comprovou-se a ausência de fissuras e outros defeitos no metal.

Durante a soldadura de aços de alto carbono ou de alta liga existe o risco de que o depósito de solda e a zona termicamente afectada contenham altas percentagens de martensite. Estas soldas apresentam elevada dureza e baixa ductilidade, podendo vir a fissurar durante o arrefecimento. Para evitar esta fissuração recorre-se às técnicas de pré-aquecimento e pós-aquecimento cuja finalidade é manter o teor de martensite da solda num nível mínimo. De ambos os tratamentos resulta maior ductilidade, menor dureza e menor probabilidade de fissuração durante o arrefecimento.

A martensite forma-se durante o arrefecimento da solda e da zona termicamente afectada. A quantidade de martensite formada pode ser limitada reduzindo-se a velocidade de arrefecimento da solda. O pré-aquecimento aumenta a temperatura do metal adjacente à solda, de tal modo que o gradiente de temperatura entre a solda e o metal de base adjacente seja reduzido. O resultado é que a zona de soldadura aquecida arrefece mais lentamente, visto que a velocidade de arrefecimento é directamente proporcional ao gradiente de temperatura entre as massas quente e fria.

Em resumo, o pré-aquecimento reduz:

- Risco de fissuração provocada pela presença de hidrogénio;
- As tensões geradas pela contracção de cada cordão;
- A dureza na zona termicamente afectada.

A composição química do material tem um papel importante na temperabilidade do material. O carbono é o elemento que influencia as características da martensite (quando ela se forma) enquanto que os outros elementos, dificultando a difusão deste elemento, influenciam igualmente a temperabilidade.

Dadas as características do ciclo térmico é necessário conhecer ou prever a temperatura em soldadura, de forma a poder conduzir a operação sem riscos de fragilização ou fissuração. Um dos critérios de avaliação da temperabilidade de um aço é através da determinação do Carbono Equivalente (CE). Trata-se de um factor empírico adoptado pela IIW – International Institute of Welding, e representa o somatório do teor em carbono com o dos outros elementos afectados de um coeficiente relativo ao poder temperante de cada.

Para se aplicar o pré-aquecimento é então necessário proceder ao cálculo de CE, recorrendo à expressão indicada pela IIW, para aços estruturais:

$$CE = \%C + \left(\frac{\%Mn}{6}\right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5}\right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15}\right) \quad (6.1)$$

Na Tabela 6.1 apresenta-se a composição química do aço utilizado na construção dos rolos de compressão (W. Nr. 1.0421).

Tabela 6.1 – Composição química do aço dos rolos de compressão

Composição química [% em peso] do aço W. Nr. 1.0421						
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
≤0,22	≤0,50	≤1,50	≤0,30	≤0,08	≤0,40	≤0,10

Substituindo os valores da tabela em (6.1) obtém-se um valor de CE de 0,59 que indica, segundo Lopes & Miranda [1993], que o aço tem pouca soldabilidade (definida segundo a AWS – American Welding Society, como sendo a «*capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projectada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço*»).

A Castolin Eutectic (empresa responsável pelo fornecimento dos eléctrodos e técnica operatória) recomenda:

- CE < 0,2 sem necessidade de pré-aquecimento;
- CE 0,2 – 0,4 pré-aquecimento entre 100-200°C;
- CE > 0,4 pré-aquecimento entre 200-350°C.

Existem vários métodos para se calcular a temperatura de pré-aquecimento (*Temp pré-aquec*), sendo um dos mais aceites o que se baseia na seguinte expressão (6.2):

$$Temp\ pré - aquec\ [^{\circ}C] = 350 \times \sqrt{CE - 0,25} \quad (6.2)$$

em que CE é o carbono equivalente do aço.

O pré-aquecimento depende do CE do aço e das dimensões e geometria da peça.

Assim, segundo a composição deste aço, a temperatura de pré-aquecimento deveria ser de 204 °C na zona de soldadura. No entanto, entendeu-se fazer um pré-aquecimento de 100 °C, com recurso a um maçarico, aplicado de forma lenta e profunda devido à grande dimensão da peça e factores de ordem prática (capacidade de aquecimento homogéneo e facilidade do soldador poder trabalhar com a radiação emitida). Esta temperatura foi mantida durante o processo de soldadura.

O revestimento por soldadura foi realizado com eléctrodos Castolin® EnDOtec NanoAlloy™ DO*390N.

Segundo Klimpel & Kik [2008] a composição química deste eléctrodo é a apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Composição química do eléctrodo Castolin DO*390N

Composição química [%] do eléctrodo Castolin DO*390N								
C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	W	B	Fe
<5,0	<2,0	<5,0	<20,0	<10,0	<10,0	<10,0	<5,0	Restante

As ligas NanoAlloy® são caracterizadas pelas suas elevadas concentrações de carbonetos de boro complexos ultra duros (M23(BC)6), carbonetos metálicos (MC) e boretos metálicos (M2B), finamente dispersos numa matriz nanoscópica de liga de ferro alfa refinada. As ligas compostas de grande resistência à abrasão são formadas tipicamente por fases de partículas angulares de carboneto de tungsténio ultra duros, numa matriz aglutinante relativamente macia (à base de Ni ou Fe). Estas estruturas nano desenvolvidas com base no estudo da engenharia de materiais apresentam características extraordinárias, ultrapassando com grande margem as estruturas cristalinas convencionais.

A estrutura única de NanoAlloy oferece:

- Uma resistência excepcional à erosão e à abrasão;
- Revestimentos de soldadura ultra duros com tenacidade;
- Dureza mantida até temperaturas ao rubro;
- Tolerância a ciclos térmicos repetidos;
- Baixo coeficiente de atrito para uma boa resistência à fricção metal-metal;
- Maior produtividade e redução de custos.

Segundo Castolin Eutectic [2006] fizeram-se testes ASTM G65, descritos por Klimpel & Kik [2008], que simulam o fenómeno de abrasão com baixa pressão para a avaliar a resistência ao desgaste da liga DO*390N. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.3. Nestes testes foram utilizados como referência relativa três passes da liga DO*33 face a um passe de DO*390N. As soldaduras foram feitas executadas com baixa entrega térmica (250 A).

Tabela 6.3 – Resultado comparativo do teste ASTM G65 para as ligas DO*33 e DO*390N

Resultado comparativo do teste ASTM G65 para as ligas DO*33 e DO*390N							
Provete	N.º provete	Massa antes teste [g]	Massa após teste [g]	Perda de massa [g]	Perda de massa média [g]	Perda de volume médio [mm³]	Resistência à abrasão relativa
DO*33	I	146,5962	146,4252	0,1710	0,1804	24,4114	1,00
	II	145,2656	145,0758	0,1898			
DO*390N	I	161,8085	161,7121	0,0964	0,1011	13,1299	1,86
	II	164,9456	164,8398	0,1058			

Os testes revelaram que a resistência à abrasão da liga DO*390N com diluição (soldadura com um passe apenas), é quase o dobro da liga DO*33 sem diluição (soldadura com três passes).

A resistência ao desgaste significativamente superior da liga DO*390N pode ser explicada pelo maior volume fraccional de carbonetos de boro estáveis e boretos no depósito e pelo íntimo espaço em escala nano dos cristais na matriz ferrítica. Consequentemente a matriz está metalurgicamente autoprotégida mantendo os constituintes duros firmemente ancorados, não existindo a possibilidade de serem removidos por vectores de abrasão ou erosão.

Este eléctrodo caracteriza-se pelo depósito sem escória com elevada concentração de carbonetos de boro complexos distribuídos uniformemente numa matriz de liga de ferro. A microestrutura exclusiva de escala nano (Fig. 6.2) garante um rendimento excepcional contra o desgaste provocado por abrasão e erosão severas conservando as suas propriedades de dureza básica até aos 750°C.

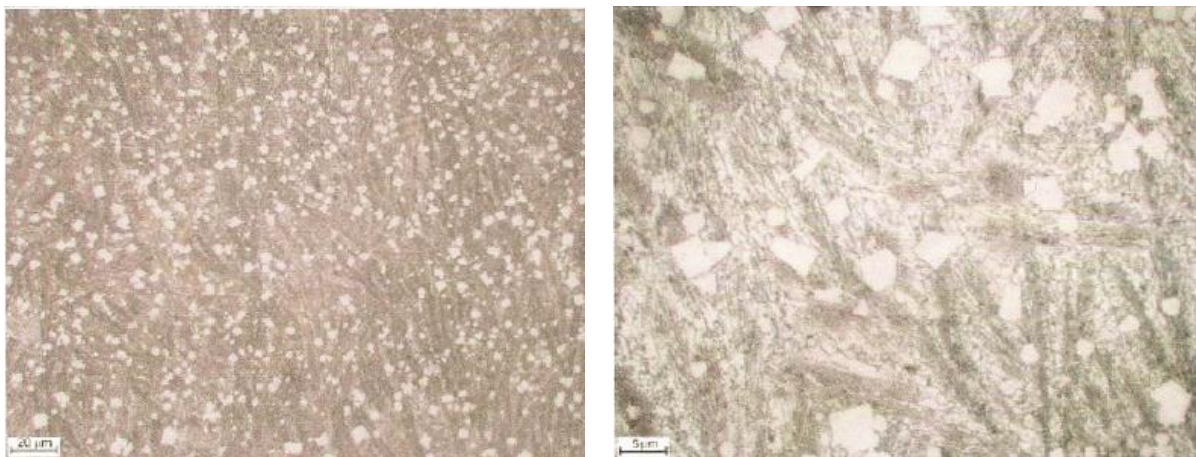


Fig. 6.2 – Microestruturas do cordão DO*390N com escala de 20 μm (à esquerda) e 5 μm (à direita)

Os depósitos de soldadura apresentam microfissuras anti-tensões particulares resultantes do processo de soldadura deste eléctrodo, contornos da superfície de soldadura lisos e sem ondulações, conforme mostra a Fig. 6.3. Estas microfissuras têm como objectivo a libertação das tensões decorrentes do processo de soldadura.

Este eléctrodo foi concebido especialmente para revestimentos de protecção com extrema resistência à abrasão e erosão em aços ao carbono, aços ligados e aços inoxidáveis, apresentando durezas de 66-68 HRC em apenas um passe e 67-71 HRC em dois passes.

Utilizou-se gás de protecção Linde® EN 439 CRONIGON 2, com 97,5% Ar e 2,5% CO_2 , uma vez que o gás de protecção recomendado para este eléctrodo deve ter esta composição.

Uma vez terminado o processo de soldadura, o arrefecimento foi controlado e o mais lento possível, tendo-se coberto a peça com isolante térmico.

Importa referir que os parâmetros de soldadura foram seleccionados criteriosamente por um soldador especializado e totalmente dedicado à tarefa de reparação dos rolos do britador.

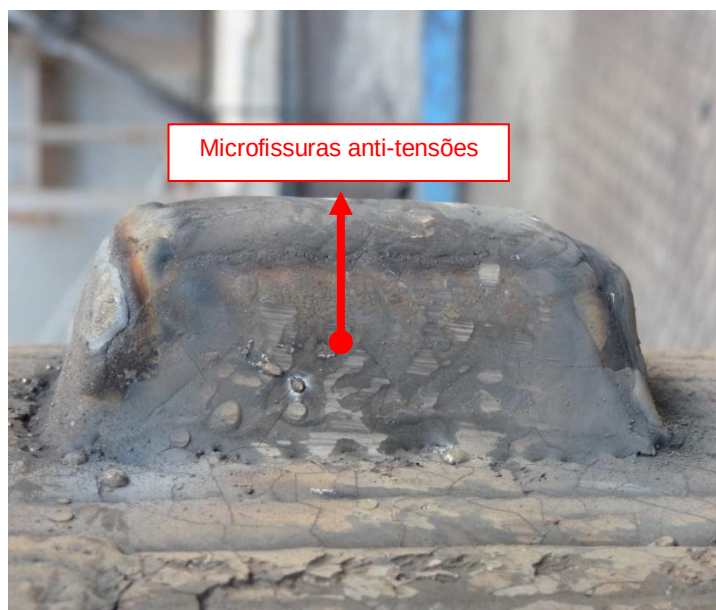


Fig. 6.3 – Superfície lisa do dente do rolo revestido e sem fissuração a frio apresentando microfissuras anti-tensões

Quanto à parte geométrica do britador foi tido em atenção o estado arredondado do dente após serviço e, em vez de substituir o dente desgastado por um novo paralelepípedo, revestiu-se com fio fluxado, protecção gasosa e as técnicas supracitadas após correcta preparação e limpeza da superfície.

Ao eliminar as “arestas vivas” procurou-se atenuar a concentração de tensões de soldadura. Adicionalmente, após o arrefecimento completo da peça procedeu-se ao processo de maquinação e acabamento de forma cuidadosa (conforme ilustram as imagens da Fig. 6.4), procurando eliminar, o mais possível, os defeitos detectados (poros, fissuras, mordeduras, etc.), que se pudessem converter em pontos de concentração de tensões.



Fig. 6.4 – Perfil arredondado do dente

Além do revestimento da superfície exterior dos rolos, em cada reparação são substituídos os tampos laterais de estanquidade (um com 16 mm, Des. 21.088 em *Anexos* e outro com 30 mm de espessura, Des. 21.087 em *Anexos*).

O histórico deste equipamento indica que a falha com maior taxa de incidência é o rebentamento do tampo de 30 mm, representado na Fig. 6.5.

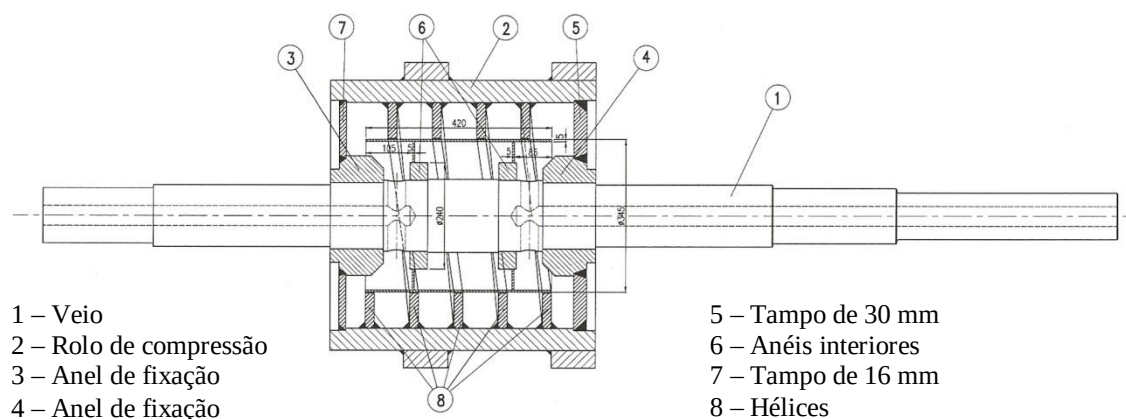


Fig. 6.5 – Corte longitudinal do conjunto do rotor

A origem deste acontecimento prende-se com a existência de uma grande quantidade de calcário no interior do rolo, essencialmente do lado da saída da água, conforme representa a Fig. 6.6. A presença de calcário não permite o escoamento da água no interior do rolo, o que provoca o aquecimento e vaporização da água causando uma sobrepressão no interior do rolo e conduzindo à rotura daquele tampo.



Fig. 6.6 – Presença de calcário à saída do veio

Na paragem anual, além da reparação da superfície dos rolos é feita a substituição dos tampos, o que permite renovar estes componentes que já tiveram em serviço, sujeitos a diversos ciclos térmicos e mecânicos, por novas peças que apresentam as suas propriedades mecânicas intactas.

Após preparação das superfícies do chanfro e do rolo na zona do chanfro iniciou-se o processo de estanhagem das com eléctrodo revestido Castolin® EC4022 de 2,5mm.

A estanhagem é uma técnica executada com intuito de acomodar as diferenças na composição e nas propriedades existentes entre os materiais de base e de soldadura, tais como coeficientes de expansão térmica e condutividade térmica.

O eléctrodo EC4022 é um eléctrodo altamente ligado à base de níquel oferecendo uma margem de segurança máxima para as soldaduras altamente solicitadas e de forte secção, graças à sua grande resistência à fissuração e à sua excelente soldabilidade em posição. Esta liga tem uma resistência à tracção superior à do material de base, que se pensa ser suficiente para um bom comportamento posterior em serviço, o seu alongamento (35%) é muito superior ao do material de base, permitindo absorver as tensões produzidas durante a soldadura, inevitáveis a 100% com o processo operativo e os esforços de dilatação e contracção em serviço.

Especialmente concebido para a soldadura de ligação de juntas de grande secção apresenta as seguintes características:

- Resistência à tracção [N/mm^2]: 660
- Limite elástico [N/mm^2]: 390
- Alongamento A5 [%]: 35
- Dureza (HV_{10}): 160

A estanhagem (Fig. 6.7) foi executada com baixa intensidade, com arco curto e eléctrodo quase vertical, tendo com finalidade minimizar o fenómeno de diluição e reduzir a zona termicamente afectada.

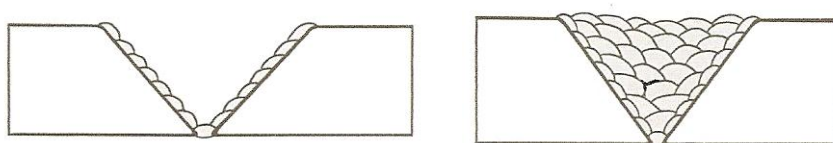


Fig. 6.7 – Técnica de estanhagem (à esquerda) e técnica de estanhagem com soldadura em múltiplas passadas (à direita)

Na soldadura dos tampos dos rolos de compressão foi ainda utilizada a técnica de “passo de peregrino” que consiste na deposição de cordões curtos, no sentido contrário ao da progressão da soldadura, devendo cada cordão sobrepor parcialmente o início do cordão anterior, como mostra a Fig. 6.8.

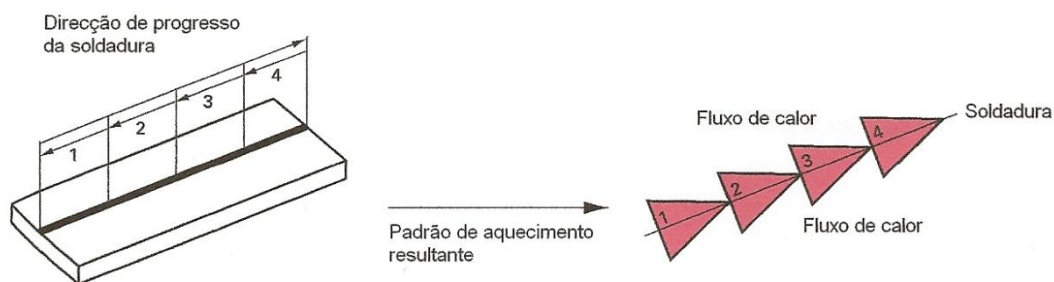


Fig. 6.8 – Sequência de soldadura com “passo de peregrino”

Esta técnica tem como objectivo a redução de tensões de contracção da soldadura graças à modificação da distribuição de calor acumulado na zona de soldadura.

Finalmente, e não menos importante, bateu-se os cordões de soldadura imediatamente após depósito com martelo de bola, para compensar, por deformação plástica, as tensões geradas pela contracção de cada cordão, cuja acumulação pode causar a rotura. A Fig. 6.9 mostra o efeito de batimento dos cordões.

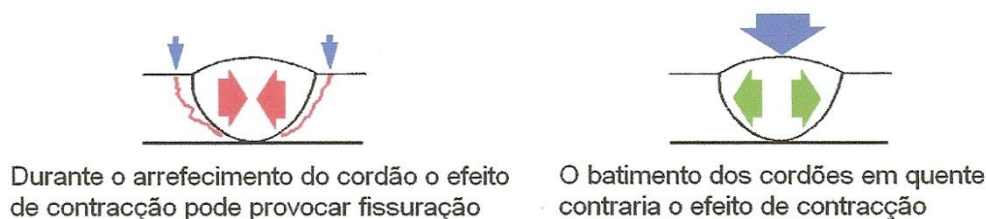


Fig. 6.9 – Efeito de batimento dos cordões

No que respeita à protecção dos veios dos rolos e aos funis superior e inferior, tiveram-se em atenção algumas situações verificadas na montagem e desmontagem do tijolo de revestimento destas peças, bem como o seu estado após serviço.

As dificuldades de preparação e aplicação do tijolo refractário associadas à heterogeneidade das superfícies levaram a reflectir acerca da existência de uma solução mais adequada para proteger estas peças. Assim, o tijolo refractário Refracta R2000 foi substituído por betão refractário Refracta PF-97-H de propriedades químicas, térmicas e mecânicas equivalentes.

O betão refractário apresenta as seguintes vantagens face ao tijolo refractário:

- Facilidade e rapidez de aplicação;
- Possibilidade de ser aplicado em geometrias complexas;
- Melhor acabamento, estanquidade e homogeneidade em juntas, comparativamente às junções dos tijolos;
- Menor mão-de-obra.

Contudo, o sucesso da aplicação depende do modo de preparação da amassadura, de aplicação, vibração e cura.

O betão refractário apresenta maior desgaste que o tijolo refractário e o custo do material por metro linear é cerca de 10-20% superior ao do tijolo. No cômputo geral, a poupança em mão-de-obra dilui a diferença por metro linear obtendo-se, neste caso, custos globais vantajosos para o betão.

A Fig. 6.10 mostra a protecção dos veios dos rolos com revestimento de betão refractário, sendo possível visualizar a superfície homogeneamente lisa. De referir que, para que fosse possível aplicar o betão refractário, a geometria desta peça foi modificada, tendo sido construído um aro em aço refractário X 15 CrNiSi 25 20 (W. Nr. 1.4841) que suporta lateralmente o material refractário.



Fig. 6.10 – Protecção dos veios dos rolos revestida a betão

A Fig. 6.11 apresenta o funil superior numa fase intermédia de aplicação do betão sendo possível visualizar a ancoragem e homogeneidade da superfície de betão.



Fig. 6.11 – Funil superior com betão refractário

6.2 Alterações ao nível do sistema de tratamento da água do britador

Conforme referido anteriormente, foi detectado o incorrecto funcionamento do sistema de descalcificação e a ausência de um sistema de refrigeração da água, pelo que, se estão a estudar as diversas possibilidades de actualização do sistema descalcificador e de aquisição de um sistema de arrefecimento de água industrial.

Convém referir que os problemas de calcário e de “água quente” não são verificados apenas no britador sendo comuns aos restantes equipamentos que requerem refrigeração por água, tais como: moinhos de cru, de carvão e de cimento; sondas de gases dos fornos; roletes de apoio do forno, entre outros.

A dureza representa a concentração de iões bivalentes presentes na água. Contribuem essencialmente para esta os iões de cálcio, magnésio, estrôncio, ferro e manganês. A dureza classifica-se em:

- Total - mede a totalidade dos iões bivalentes;
- Cálctica - mede o teor em cálcio;
- Magnesiana - mede o teor em magnésio.

Embora não haja uma convenção formal, a título prático, a água pode ser classificada quanto à dureza de acordo com a Tabela 6.4:

Tabela 6.4 – Dureza da água

Designação da água	Teor de CaCO_3/L
Muito mole	0 a 70 ppm
Mole	70-135 ppm
Média dureza	135-200 ppm
Dura	200-350 ppm
Muito dura	mais de 350 ppm

No que concerne ao sistema de descalcificação de água existente foram feitas análises da água à entrada e saída do equipamento, por forma a aferir a capacidade de remoção da dureza da água requerida. A água à entrada apresenta 310 ppm CaCO_3/L e à saída 180 ppm CaCO_3/L , bastante superior às 40 ppm CaCO_3/L pretendidas. Este valor comprova que o sistema de descalcificação não está a funcionar correctamente pois não tem capacidade de remover a quantidade de iões Ca^{2+} que evite incrustações nas tubagens e demais equipamentos fabris.

Para o correcto dimensionamento dos equipamentos de refrigeração de água foram medidos os caudais volumétricos e temperaturas da água de retorno do britador de clínquer (cerca de $30\text{m}^3/\text{h}$ a 65°C) e de toda a fábrica (aproximadamente $80\text{m}^3/\text{h}$ a 45°C).

O sistema de refrigeração será dimensionado para arrefecer $80\text{m}^3/\text{h}$ de 45°C para 25°C (temperatura de água de alimentação admissível para arrefecimento dos equipamentos fabris).

O cálculo da potência térmica de arrefecimento $\dot{Q}_{arr}$ [W] faz-se através da expressão (6.3):

$$\dot{Q}_{arr} [W] = \dot{m} \times cp \times \Delta t \quad (6.3)$$

em que $\dot{m}$ é o caudal mássico [kg/s], cp o **calor específico da água** ($cp = 4,184$ [J/kg·°K]), e Δt a diferença entre a temperatura de entrada e de saída da água.

Calcula-se o caudal mássico de água através da expressão (6.4) correspondente a $80\text{m}^3/\text{h}$ a uma temperatura média de $T_m = \frac{(273,15+45)+(273,15+25)}{2} = 308,15$ [°K].

$$\dot{m} = \dot{v} \times \rho \quad (6.4)$$

em que $\dot{v}$ é o caudal volumétrico [m^3/s] e ρ a massa volúmica [kg/m^3]

Pelas tabelas das propriedades termodinâmicas da água obtém-se para 308,15°K os seguintes valores: $\rho = 994 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ e $cp = 4178 \text{ [J/kg}\cdot\text{°K]}$ (valores obtidos por interpolação através das Tabelas Termofísicas da Água Saturada em Incropera & DeWitt [1998]).

Substituindo ρ em (6.4) tem-se:

$$\dot{m} = \frac{80}{3600} \times 994 \Leftrightarrow \dot{m} \cong 22,09 \text{ [kg/s]}$$

Substituindo o valor de $\dot{m}$ e de cp em (6.3) tem-se:

$$\dot{Q}_{arr} = 22,09 \times 4178 \times (318,15 - 298,15) \Leftrightarrow \dot{Q}_{arr} \cong 1.845.840 \text{ [W]}$$

Portanto, para arrefecer a água para as condições pretendidas é necessário adquirir um equipamento que apresente uma capacidade de dissipação de calor de cerca de 1,8 MW.

Contudo, os custos envolvidos para a aquisição deste tipo de equipamentos requerem a aprovação de Ordens de Investimento cujos montantes se cifram em cerca de 150.000€.

Este valor poderá ser considerado elevado se se menosprezar a possibilidade de paragem do forno de branco devido à obstrução com calcário do canal de saída da água de refrigeração dos rolos que poderá provocar um novo rebentamento de um rolo cuja reparação requer cerca de uma semana.

Tendo em conta esta situação, no ponto seguinte, faz-se a análise de custos associados a uma paragem de cinco dias da linha de branco.

7 Análise de custos

Consoante foi referido inicialmente, o principal objectivo deste trabalho é evitar paragens intermédias às manutenções anuais planeadas da linha de branco por falha do britador de clínquer.

A estas paragens intermédias estão associados, entre outros, os seguintes custos:

- 1) Custos de arranque da linha de produção;
- 2) Custos de manutenção;
- 3) Custos de não produção.

Os custos de arranque são difíceis de quantificar pois envolvem principalmente custos energéticos. Estes custos representam custos de electricidade e combustível utilizado no aquecimento e arranque do forno. O aquecimento do forno tem duração de cerca de oito horas. Nas primeiras quatro horas o combustível utilizado é o fuel com alimentação de cerca de 4,5 t/h e nas restantes o aquecimento é feito a coque de petróleo sendo a alimentação de 6 t/h. Na Tabela 7.1 calcula-se o custo de combustíveis gastos no aquecimento do forno.

Tabela 7.1 – Custo dos combustíveis de aquecimento do forno

Custo dos combustíveis de aquecimento do forno			
Combustível	(I) Quantidade de combustível utilizada [t]	(II) Custo do combustível [€/t]	(III) Custo total [€] (I×II)
Fuel	4 h × 4,5 t/h = 18 t	317€/t	5706
Coque	4 h × 6 t/h = 24 t	71€/t	1704
Total	---	---	7410

Os custos dos combustíveis utilizados para o aquecimento do forno são de aproximadamente 7.400€. Os custos de electricidade são difíceis de calcular pois é complicado quantificar os consumos de cada equipamento na fase de arranque do forno. Por este motivo e pelo facto de representarem uma pequena fracção dos custos globais, os custos de electricidade não serão considerados nesta análise.

Relativamente aos custos de manutenção, estes incluem: os custos de serviços externos, tome-se como exemplos a reparação dos rolos de compressão do britador de clínquer, a análise da condição dos rolamentos; materiais, tais como perfis de aço, eléctrodos, ferramentas, consumíveis e outros necessários à reparação do britador; mão-de-obra interna necessária para conseguir o acesso ao britador, operar a grua, substituir os rolos, etc. Tomando como exemplo a última reparação dos rolos, estes custos são da ordem dos 7.000€.

Quanto aos custos de não produção – a maior parcela dos custos globais associados à falha do equipamento – esta inclui as perdas de facturação às quais estão associados lucros que, desta forma, não podem ser contabilizados. Na Tabela 7.2 são determinados os custos diários de não produção.

Tabela 7.2 – Análise do custo diário de não produção

Custo diário de não produção				
(I) Produção média diária de clínquer [t]	(II) Incorporação média de clínquer no cimento [%]	(III) Produção média diária de cimento [t] (I÷II)	(IV) Margem média sobre custos semi- fixos e variáveis [€/t]	(V) Custo diário de não produção [€] (III×IV)
290	78,5	369	14	5166

Assim, os custos de não produção associados a um dia de paragem da linha de branco são aproximadamente 5.166€.

Importa referir que, o valor de 5.166€ obtido corresponde aos custos de não produção relativos a um dia, considerando que todo o clínquer produzido é “transformado” em cimento e que toda a quantidade de cimento é comercializada. Os custos de não produção associados a uma reparação do britador não planeada, com duração de cinco dias, são portanto de cerca de 25.830€. Actualmente, a procura do mercado interno é satisfeita com relativa facilidade (em cerca de seis meses de laboração da linha) pelo que o cimento produzido no restante tempo de funcionamento da linha será colocado no mercado externo com margens menores e consoante a oportunidade que surja para escoar o produto. Contudo, este facto não deve ser visto como uma forma de menosprezar a disponibilidade da linha produção de cimento branco, sendo preferível entender a importância de estar preparado e disponível para uma eventual oportunidade de fornecimento do produto e, assim, conseguir alargar o mercado.

Os custos de não produção associados a uma paragem do forno não planeada, com duração de cinco dias, apresentam-se na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Custos totais associados a uma paragem não programada de cinco dias

Custo diário de não produção		
Natureza dos custos	Montante [€]	Total [€]
Arranque	7410	40240
Manutenção	7000	
Não produção	25830	

Assim, o projecto de optimização do britador de clínquer branco visa alcançar uma poupança de, aproximadamente, **40.000€**.

8 Conclusões

Este trabalho teve como objectivo principal optimizar o britador de clínquer branco mediante alterações à construção e condições de funcionamento deste, tendo em conta o seu papel vital na linha e procurando evitar a sua falha com inevitáveis custos associados.

De acordo com o disposto em 5.5 *Problemas verificados após operação e suas causas* procurou-se dar resposta aos problemas do britador de clínquer actuando nas suas causas.

Assim, a Tabela 8.1 expõe, sumariamente, as soluções apresentadas para cada um dos problemas.

Tabela 8.1 – Soluções apresentadas para os problemas do britador de clínquer

Optimização do britador de clínquer branco				
Abrangência	Problema	Descrição	Natureza da causa	Decisão adoptada
Ao nível do corpo do britador	A	Arrancamento do revestimento duro	Operacional	Seleccionar eléctrodos contínuos de soldadura com mais ductilidade, resistência às elevadas temperaturas e resistência à abrasão
		Geometria do dente inadequada	Estrutural	Utilizar uma geometria de dente arredondada
	B	Insuficiente preparação da soldadura	Operacional	Utilizar pré e pós-aquecimento na soldadura, utilizar gás de protecção, regular correctamente os parâmetros de soldadura
	C	Dificuldade de aplicação do tijolo	Operacional	Aplicar betão refractário em detrimento de tijolo refractário
Heterogeneidade da superfície dos funis		Estrutural		
Ao nível do sistema de tratamento da água do britador	D	Presença de calcário no interior do britador	Sistema de Descalcificação	Actualizar o sistema de descalcificação de acordo com as capacidades requeridas
		Elevada temperatura da água de refrigeração	Sistema de Refrigeração	Implementar um sistema de refrigeração da água de alimentação

O trabalho aqui apresentado, devido à sua natureza e complexidade, não se pode considerar completo, contudo desenvolvido considero ter contribuído com alguma inovação no que se refere à análise das causas de falha do britador de clínquer branco e apresentação de soluções para as mesmas.

Nesta fase, as alterações estudadas ao nível do corpo do britador foram implementadas, no entanto, à data de realização deste trabalho, não se dispõe de conclusões práticas, uma vez que, o britador se encontra em funcionamento não sendo possível verificar as melhorias.

Relativamente ao sistema de tratamento de água industrial – bastante importante, não só para o correcto funcionamento do britador mas também para os demais equipamentos fabris – este encontra-se em fase de aprovação da respectiva Ordem de Investimento.

No que respeita aos objectivos gerais do estágio, igualmente importantes, penso ter progredido em termos de formação académica através do conhecimento de diversos tipos de equipamentos mecânicos, cada um com as suas características, princípios de funcionamento e situações problemáticas.

Estas situações possibilitaram a aquisição de competências técnicas que foram desenvolvidas pelo acompanhamento das tarefas de manutenção realizadas nos equipamentos e, ao mesmo tempo, devido à procura da causas e, eventuais, soluções para os referidos problemas.

9 Referências

- CASTOLIN. (s.d.). Obtido em 01 de 09 de 2010, de Web site de Castolin Eutectic:
http://www.castolin.pt/wCastolin_pt/core/products/welding/DO_390N.php
- Castolin Eutectic. [2006]. *NEW EnDOtec DO*390N*. Internal document for Technical Sales Staff No. 01/06.
- Cibra. (s.d.). Fábrica Cibra-Pataias. *Mensagem d' O Conselho de Administração*. Pataias, Portugal.
- CIMPOR. (s.d.). Obtido em 01 de 09 de 2010, de Web site de CIMPOR:
<http://www.cimpor.pt/cronologia.aspx?cntx=61YLZQI6H1B%2FWYnApolDQuSdB D5QnSpH5W2VvVVrPCbJM8w8ydeZfmlscDK4nCX4>
- CMP - Cimento Maceira e Pataias. [2006]. *Declaração Ambiental Intercalar da Fábrica Cibra-Pataias*. Pataias.
- Ferreira, L. A. [1998]. *Uma Introdução à Manutenção*. Porto: Publindústria.
- Gonçalves, C. D. [2005]. *Gestão da Manutenção de um Sistema de Cozedura na Indústria Cimenteira*. Dissertação de Mestrado, Lisboa.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. [1998]. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa* (4ª ed.). LTC Editora.
- Klimpel, A., & Kik, T. [2008]. Erosion and abrasion wear resistance of GMA wire surfaced nanostructural deposits. *Archives of Materials Science and Engineering*, 4.
- Lopes, E. M., & Miranda, R. M. [1993]. *Metalurgia da Soldadura*. Edições Técnicas do ISQ.
- SECIL - Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. (s.d.). Programa de Formação Continuada Quadros: Trainees. *Processo I*. Setúbal, Portugal.
- SEMAPA. (s.d.). Obtido em 01 de 09 de 2010, de Web site de SEMAPA:
<http://www.semapa.pt/default.asp?detectflash=false&pag=historia>
- Wikipédia. (s.d.). Obtido em 01 de 09 de 2010, de Web site de Wikipedia:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Dureza_da_%C3%A1gua
- Wikipédia. (s.d.). Obtido em 01 de 09 de 2010, de Web site de Wikipedia:
http://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent_carbon_content

10 Anexos