

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE APLICADA À MANUTENÇÃO

CLAUDIO CESAR PEREIRA

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE DE UM RESFRIADOR DE
GRELHAS UTILIZADO EM INDÚSTRIAS DE CIMENTO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2012

CLAUDIO CESAR PEREIRA

**ESTUDO DE CONFIABILIDADE DE UM RESFRIADOR DE
GRELHAS UTILIZADO EM INDÚSTRIAS DE CIMENTO**

Monografia de Especialização
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia da
Confiabilidade da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Marcelo Rodrigues,
M.Sc.

CURITIBA

2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me criou e me deu toda a inspiração necessária para a realização deste curso e desta monografia.

Ao Professor Msc. Marcelo Rodrigues pelas orientações tão bem conduzidas e pela costumeira dedicação.

À Professora Dra. Faimara do Rocio Strauhs pela orientação da metodologia de pesquisa e formatação.

Aos meus colegas de trabalho, em especial meu Coordenador Arilson Batista Lauxen e o Analista de Desgastes Djair Surgik, pelas informações prestadas e apoio incondicional.

Também aos membros da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

Por último, e não menos importante, à minha esposa e filho que me apóiam e me incentivam e compreendem os momentos de ausência temporária.

RESUMO

PEREIRA, Claudio Cesar. **Estudo de confiabilidade de um resfriador de grelhas utilizado em indústrias de cimento**. 81 f. 2012. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade Aplicada à Manutenção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

Esta monografia de especialização tem por objetivo o estudo de confiabilidade de um resfriador de grelhas utilizado em indústrias de cimento. Apresenta conceitos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade de sistemas. Discute a sistematização e padronização de planos de manutenção, com base nas ações de cada equipe de manutenção. Complementado por uma pesquisa de campo, o estudo busca encontrar, por meio de estratificação das falhas, qual é a confiabilidade do resfriador de grelhas. Traz como resultado a sistematização da manutenção e embasamento para tomada de decisão de aquisição de programas de simulação e implementação da Engenharia da Confiabilidade.

Palavras-chave: Resfriador de grelhas. Confiabilidade. Manutenibilidade. Disponibilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manutenção Corretiva Não-planejada	17
Figura 2 – Manutenção Preventiva.....	18
Figura 3 – Manutenção Preditiva.....	20
Figura 4 – Curva da Banheira	22
Figura 5 – Representação de blocos em série e paralelo.....	24
Figura 6 – Símbolos de eventos da FTA	28
Figura 7 – Conectores lógicos da FTA	29
Figura 8 – Símbolos de transferência da FTA	29
Figura 9 – Porta lógica “OU”	30
Figura 10– Porta lógica “E”	30
Figura 11– Fluxograma do processo de produção de cimento	32
Figura 12 – Vista esquemática de um britador de martelos.....	33
Figura 13 – Vista do morro de quartzito com o calcário na parte inferior	33
Figura 14 – Forno rotativo com ciclone pré-aquecedor	35
Figura 15 – Vista esquemática de um resfriador de grelhas.....	36
Figura 16 – Esquema de distribuição do ar de resfriamento.....	36
Figura 17 – Grelha trincada.....	41
Figura 18 – Grelha deformada	41
Figura 19 – Braço de acionamento da grelha deformado	43
Figura 20 – Suporte e braço de acionamento novo.....	43
Figura 21 – Acionamento da grelha	43
Figura 22 – Suporte e rodas de apoio	43
Figura 23 – Folga entre vedação e viga	44
Figura 24 – Chapa de vedação entre câmaras.....	44
Figura 25 – Chapa de vedação na região de fixação das placas	44
Figura 26 – Vigas centrais desgastadas.....	45
Figura 27 – Vigas centrais novas	45
Figura 28 – Viga transversal fixa deformada	45
Figura 29 – Viga transversal fixa nova	45
Figura 30 – Folga entre grelhas centrais e laterais.....	46
Figura 31 – Gabarito de ajuste da folga lateral.....	46
Figura 32 – Barra de ajuste da folga frontal	46

Figura 33 – Grelha com as laterais usinadas	47
Figura 34 – Grelha com o assento usinado	47
Figura 35 – Grelha com rebaixo e sem revestimento em “X”	47
Figura 36 – Desenho esquemático da grelha com rebaixo e sem revestimento em “X”	47
Figura 37 – Grelha com revestimento em “X” e furos centrais (vale).....	48
Figura 38 – Grelha com revestimento em “X” e furos no pico.....	48
Figura 39 – Desenho esquemático da grelha com revestimento em “X” e furos no pico	48
Figura 40 – Revestimento de grelha com <i>arc spray</i>	49
Figura 41 – Mapa de grelhas	49
Figura 42 – Resfriador rotativo	65
Figura 43 – Vista interna do forno e do resfriador unax	66
Figura 44 – Resfriador planetário	67
Figura 45 – Vista interna do resfriador de grelhas	68
Figura 46 – Distribuição do clínquer na grelha	70
Figura 47 – Resfriador Fuller.....	72
Figura 48 – Detalhe do conduto de ar	73
Figura 49 – Resfriador Coolax	74
Figura 50 – Resfriador Recupol	75
Figura 51 – Resfriador IKN.....	77
Figura 52 – Funcionamento do <i>heat shield</i>	77
Figura 53 – Resfriador Folax.....	78
Figura 54 – Regulagem mecânica do fluxo de ar	78
Figura 55 – Distribuição de ar	79
Figura 56 – Resfriador <i>Cross Bar</i>	79
Figura 57 – Resfriador Claudius Peters.....	80
Figura 58 – Britador de rolos e britador de martelos	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estratificação de Paradas do Forno e Resfriador (1998 a 2004)	39
Tabela 2 – Estratificação de Paradas do Forno e Resfriador (2005 a 2011)	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Trocas anuais de grelhas do resfriador (1998 a 2004)	41
Gráfico 2 – Trocas anuais de grelhas do resfriador (2005 a 2011)	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 TEMA.....	10
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	11
1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	12
1.4 OBJETIVO	13
1.4.1 Objetivo Geral	13
1.4.2 Objetivos Específicos	13
1.5 JUSTIFICATIVA.....	14
1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
2 MANUTENÇÃO, CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE	
16	
2.1 INTRODUÇÃO	16
2.2 MANUTENÇÃO.....	16
2.2.1 Manutenção Corretiva	17
2.2.2 Manutenção Preventiva.....	18
2.2.3 Manutenção Preditiva.....	19
2.2.4 Manutenção Detectiva.....	20
2.3 CONFIABILIDADE	21
2.3.1 Confiabilidade de Sistemas	23
2.3.1.1 Método dos diagramas de blocos.....	23
2.3.1.2 Método de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA).....	24
2.3.1.3 Método de Análise de Árvore de Falhas (FTA).....	26
2.3 DISPONIBILIDADE	30
2.4 MANTENABILIDADE	31
3 AMBIENTE EXPLORADO	32
3.1 MINERAÇÃO, EXTRAÇÃO E PRÉ-HOMOGENEIZAÇÃO	32
3.2 MATÉRIAS PRIMAS E MOAGEM DE CRÚ	34
3.3 SECAGEM E HOMOGENEIZAÇÃO DA FARINHA CRUA	34
3.4 PRÉ-AQUECIMENTO E PRÉ-CALCINAÇÃO	34
3.5 CLINQUERIZAÇÃO	35

3.6 MOAGEM DE CLÍNQUER E ADIÇÕES	37
3.7 ARMAZENAGEM E EXPEDIÇÃO	37
4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	38
4.1 CENÁRIO ANTES DAS MELHORIAS.....	38
4.2 CENÁRIO APÓS AS MELHORIAS	42
5 CONCLUSÕES	54
5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE A – ESTRATIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA	58
APÊNDICE B – FORMULÁRIO - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA, SEUS EFEITOS E SUA CRITICIDADE (FMECA)	61
ANEXO A – RESFRIAMENTO DE CLÍNQUER	63

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo é composto do Tema, da Delimitação da Pesquisa, dos Problemas e Premissas, dos Objetivos Gerais e Específicos, da Justificativa e, por último, dos Procedimentos Metodológicos.

1.1 TEMA

Conforme estudo elaborado pelo economista Rafael Miranda e divulgado pela empresa Indicador Consultores Associados (2011), a construção civil cresceu em uma taxa média de 5,1%, acima da taxa da economia nacional, no período de 2004 a 2008. Ainda, segundo este estudo, “um resultado expressivo para um setor que passou por décadas de estagnação. Este crescimento não se deu de forma repentina, mas sim decorrente de mudanças institucionais e da própria evolução do cenário macroeconômico” (INDICADOR CONSULTORES ASSOCIADOS, 2011, p.6).

Por meio de políticas fiscais, como a redução do Imposto Sobre Produtos Industrializados (IPI) de alguns materiais de construção e de políticas sociais, como o Programa Minha Casa, Minha Vida (PMCMV), o setor desempenhou um papel contrário se comparado com a economia nacional (INDICADOR CONSULTORES ASSOCIADOS, 2011).

O economista Rafael Miranda afirma que:

A construção não apenas recuperou o ritmo observado em 2008, mas já cresce a taxas superiores. O setor da construção civil ganhou um papel de destaque nos últimos tempos, que não é função do acaso, pois vários fatores contribuíram para o melhor desempenho do setor. O incremento na oferta de crédito imobiliário, o aumento do emprego formal, o crescimento da renda per capita e a estabilidade macroeconômica foram alguns desses fatores (INDICADOR CONSULTORES ASSOCIADOS, 2011, p.8).

Em 2010 o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) divulgou uma tabela de produção mensal de cimento, de janeiro de 2008 a julho de 2010, que mostra a seguinte conclusão:

A indústria de cimento se comportou de maneira atípica no período da crise. Ela não reduziu o nível de produção em 2009 como a maioria das outras indústrias produtoras de insumos da construção civil e fechou o ano de 2009 praticamente com a mesma produção de 2008. Em 2010, a produção superou os dois anos anteriores no mesmo período, sinal que 2010 foi um ano recorde na produção de cimento (INDICADOR CONSULTORES ASSOCIADOS, 2011, p.41).

Conforme o Cenário Macroeconômico 2009-2016 divulgado pela Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção (ABRAMAT) espera-se um grande incremento nas atividades do setor da construção em infraestrutura e outras atividades ligadas aos eventos esportivos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 2009). Existe grande expectativa em relação às obras para a Copa do Mundo e Olimpíadas, mas, sem sombra de dúvida, as construções habitacionais darão o ritmo das atividades na construção civil.

Diante deste cenário amplamente promissor é fundamental garantir a disponibilidade dos ativos, e conseqüentemente, atender a demanda de cimento. Em um mercado altamente competitivo como este, composto por 14 grupos cimenteiros, com 79 fábricas no Brasil (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2011), uma parada de forno pode trazer prejuízos incontáveis.

Este trabalho de pesquisa tem a finalidade apresentar um estudo de confiabilidade de um resfriador de grelhas.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O objeto deste estudo é o resfriador de grelhas, equipamento responsável pelo resfriamento do clínquer¹, desenvolvido para ser operado em conjunto com o forno rotativo. Este resfriamento influi na estrutura, composição mineralógica, bem como na moabilidade e conseqüentemente na qualidade do cimento. Tem como finalidade recuperar o calor do clínquer descarregado pelo forno diminuindo com

¹ O clínquer é o principal item na composição de cimentos *portland*, sendo a fonte de Silicato tricálcico $(CaO)_3SiO_2$ e Silicato dicálcico $(CaO)_2SiO_2$. Estes compostos trazem acentuada característica de ligante hidráulico e estão diretamente relacionados com a resistência mecânica do material após a hidratação.

isso sua temperatura, permitindo seu transporte em condições seguras até o depósito de estocagem, bem como fornecer o ar quente necessário à combustão.

O resfriamento é necessário por que:

- o clínquer quente é difícil de transportar;
- o clínquer quente tem um efeito negativo no processo de moagem;
- recupera-se parte do calor que sai com o clínquer;
- garante a qualidade do cimento.

Este equipamento está instalado em uma empresa do segmento de fabricação de cimentos, localizada na região metropolitana de Curitiba.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

A entrada do resfriador é equipada com uma grelha de resfriamento rápido com ar de insuflamento próprio para promover o resfriamento inicial do clínquer. A grelha de resfriamento rápido é seguida por uma ou mais seções de grelhas horizontais (ITAMBÉ - DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO, 2000). Em alguns casos, a primeira seção pode ser inclinada. Abaixo da grelha, o resfriador é dividido em compartimentos providos de sopradores para injeção de ar de resfriamento. Este arranjo garante ótima distribuição de ar. Este resfriador é equipado com revestimento refratário monolítico. Após o resfriador, o clínquer fino passa sobre uma grade na saída e o clínquer grosso é britado em um britador de martelos. Uma cortina de correntes protege o revestimento do resfriador de partículas que porventura ricocheteiem (ITAMBÉ - DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO, 2000).

Para evitar a deformação das grelhas pela alta temperatura do clínquer, o processo de fabricação deve estar bem estabilizado, garantindo-se adequada velocidade das grelhas em relação ao volume e temperatura do ar introduzido no resfriador e, também, adequada temperatura e dimensões do clínquer que cai no resfriador (APOSTILA DE OPERAÇÃO DE FORNOS POLYSIUS, 2000). Quando o forno se encontra em condições estáveis de funcionamento, o ar secundário é controlado pela velocidade das grelhas que significa que a espessura da camada de clínquer é o fator de controle. Assim, um aumento na velocidade das grelhas, ou

seja, uma diminuição da espessura da camada de clínquer origina uma temperatura do ar secundário mais baixa e uma velocidade mais baixa das grelhas, provoca um aumento na temperatura do ar secundário (APOSTILA DE OPERAÇÃO DE FORNOS POLYSIUS, 2000).

Quando ocorre uma deformação nas grelhas, seja por trincas ou por furos, acontece a queda de material grosso e incandescente nas válvulas de finos, logo abaixo do resfriador. A única maneira de fazer a intervenção neste equipamento é parando o forno, o que gera um elevado custo, devido ao tempo de resfriamento e aquecimento (retomada) do mesmo, além do custo dos materiais fundidos.

O Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) utiliza-se de ações isoladas para corrigir as falhas no resfriador de grelhas, decorrentes do desgaste acentuado das placas de grelha.

O desejo do DEM é agir de forma sistêmica para otimizar tanto os recursos humanos quanto os financeiros. A sistematização do plano de manutenção do resfriador de grelhas visa evitar os efeitos de uma parada indesejada do forno, devido aos altos custos envolvidos e, também, pela crescente demanda de cimento e, conseqüentemente, acirrada concorrência dos grupos cimenteiros.

1.4 OBJETIVO

1.4.1 Objetivo Geral

Elaborar um estudo de confiabilidade de um resfriador de grelhas utilizado em indústrias de cimento, como elemento de apoio a tomada de decisão para sistematizar as tarefas de manutenção e implementar a Engenharia da Confiabilidade.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analisar o plano de manutenção tanto do resfriador de grelhas quanto dos equipamentos complementares;
- Definir a melhor política de troca das grelhas;
- Definir o melhor projeto de fabricação das grelhas;
- Levantar o histórico de falhas do Sistema Forno e Resfriamento;
- Levantar o histórico de falhas do Subsistema Resfriamento;
- Detalhar as interfaces (fronteiras) dos equipamentos do Subsistema Resfriamento;
- Discutir os resultados obtidos e seus benefícios para a sistematização da manutenção e implementação da Engenharia da Confiabilidade.

1.5 JUSTIFICATIVA

O objetivo de se fazer este estudo é, primeiramente, reduzir as horas de paradas de máquina, padronizar as ações de manutenção e otimizar o custo. Em segundo lugar, porque servirá de material de apoio para tomada de decisão para aquisição de programas de simulação e desenvolvimento de novos estudos, uma vez que a empresa está se voltando para isso, analisando casos de sucesso em empresas como Vale, Petrobras, Metrô de São Paulo, entre outras.

Busca-se com isso, assegurar o aumento da confiabilidade e da disponibilidade dos ativos, além de aumentar a produtividade, a segurança operacional e ambiental e a redução de custos da empresa. Também, assegurar que novos ativos sejam colocados em operação com rapidez, confiança e precisão.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Uma pesquisa, segundo Silva e Menezes (2005), é classificada das seguintes maneiras: quanto aos procedimentos adotados, quanto à natureza, quanto à forma de abordagem e quanto aos objetivos.

Quanto aos procedimentos, foram adotados neste trabalho os seguintes:

pesquisa bibliográfica e estudo de campo.

Quanto à sua natureza, esta pesquisa se caracteriza como aplicada o que, segundo Silva e Menezes (2005), gera conhecimento para ações práticas e dirigidas à solução de problemas específicos. A aplicação prática está caracterizada no levantamento das taxas de falha do Subsistema Resfriamento. O problema específico que se quer saber é qual a confiabilidade deste mesmo Subsistema.

Quanto à forma de abordagem, este trabalho se classifica como qualitativo. Os levantamentos serão efetuados em pastas de manutenção e registros de paradas de equipamentos, a partir de uma pesquisa documental.

Quanto aos objetivos, este trabalho se classifica como explicativo, pois servirá para tomada de decisão na implementação da Engenharia da Confiabilidade.

A formatação segue as normas e recomendação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, com a finalidade de atingir o objetivo proposto inicialmente, divididos da seguinte maneira:

O primeiro capítulo é introdutório, e apresenta o tema e os objetivos propostos.

No segundo capítulo são apresentados conceitos de manutenção, confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

No terceiro capítulo é descrito o ambiente explorado, com uma breve explanação do processo de fabricação de cimento.

No quarto capítulo é apresentado o desenvolvimento da pesquisa, os dados coletados, a simulação da confiabilidade, bem como o resultado da pesquisa.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho. Logo após este capítulo, constam os elementos pós-textuais, como as referências e o anexo.

2 MANUTENÇÃO, CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE

2.1 INTRODUÇÃO

A modernização das linhas de produção e a qualificação dos produtos ofertados têm-se tornado extremamente necessárias diante de um mercado amplamente competitivo e de clientes cada vez mais exigentes. Por isso, as empresas precisam focar mais na gestão da manutenção para se desenvolverem e para se tornarem mais eficientes.

Desta forma, de acordo com Teixeira (2004), a manutenção tem evoluído significativamente, deixando em segundo plano o papel de conservar (consertar ou reparar) priorizando o foco em manter (prevenir, corrigir). Cada vez mais os conceitos de confiabilidade estão sendo agregados à função manutenção.

É de extrema importância que esta modernização esteja vinculada a procedimentos que, baseados em informações quantitativas, sejam capazes de otimizar a utilização e a manutenção desses novos meios produtivos.

2.2 MANUTENÇÃO

A manutenção pode ser definida como um conjunto de conhecimentos, técnicas e habilidades com o intuito de garantir que a função de equipamentos ou de sistemas seja cumprida dentro do período planejado.

Pinto e Xavier (2001, p.35) alertam que “a maneira pela qual é feita a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações caracteriza os vários tipos de manutenção existentes”.

Pode-se dizer que existem três práticas básicas de manutenção: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva (SOUZA, 2008). Outros autores, como Pinto e Xavier (2001) e Moubray (2000), apontam outros dois tipos de manutenção: manutenção detectiva e engenharia de manutenção.

2.2.1 Manutenção Corretiva

É a atuação para a correção de uma falha ou do desempenho abaixo do esperado. Segundo a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane sendo destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.

Geralmente é o tipo de manutenção que mais sobrecarrega as equipes de manutenção e implica em altos custos, pela perda da produção e pela aquisição de peças e (ou) serviços em caráter de urgência.

Além dos fatores acima, as quebras aleatórias podem produzir conseqüências muito graves para os equipamentos. Indústrias de processo contínuo, como a de cimento, possuem muitas variáveis no seu processamento, como elevadas pressões, temperaturas e vazões e uma parada inesperada do processo pode afetar equipamentos que vinham operando de maneira satisfatória.

A manutenção corretiva não-planejada de um determinado equipamento é representada pela Figura 1, onde se pode observar que o tempo até a falha é aleatório e $t_0 - t_1$ é diferente de $t_2 - t_3$, ou seja, ocorre uma queda de desempenho com o tempo.

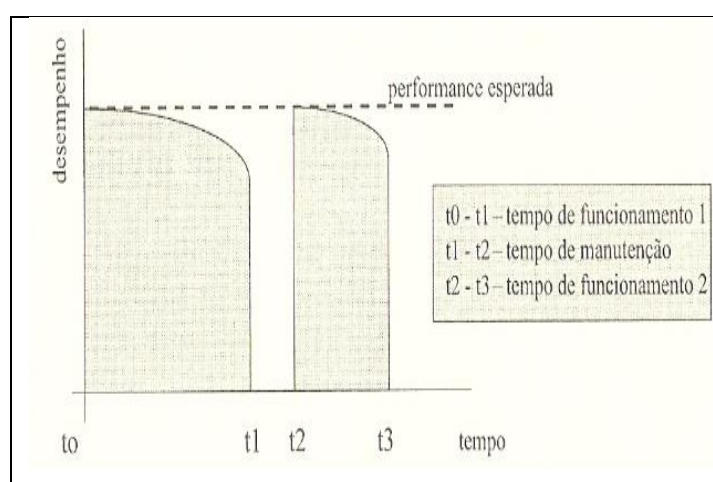


Figura 1 – Manutenção Corretiva Não-planejada
Fonte: Pinto e Xavier (2001)

É importante ressaltar que existem equipamentos ou componentes que não seguem este padrão de comportamento, são constantes ao longo do tempo e apresentam falhas aleatórias (PINTO e XAVIER, 2001). Componentes eletrônicos ou lâmpadas são exemplos desse tipo de comportamento, pois não avisam quando

a falha vai acontecer, simplesmente deixam de funcionar.

2.2.2 Manutenção Preventiva

Segundo Pinto e Xavier (2001, p.39), manutenção preventiva “é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo”.

Segundo a norma NBR 5462 (ABNT, 1994) é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

De maneira simples, o objetivo da manutenção preventiva é evitar a ocorrência de falhas, ou seja, preveni-las.

A atividade de manutenção preventiva sistemática é aplicada quando a lei de degradação é conhecida. Essa lei diz respeito ao conhecimento sobre a evolução do desgaste do equipamento, à medida que é utilizado. Esse processo ocorre de modo mais acelerado se o equipamento for operado inadequadamente. A Figura 2 mostra que não pode ser descartada a falha entre duas intervenções preditivas, o que implicará uma ação corretiva.

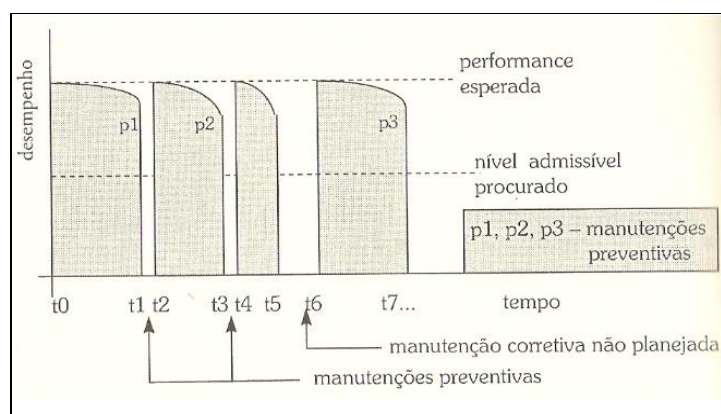


Figura 2 – Manutenção Preventiva
Fonte: Pinto e Xavier (2001)

As vantagens deste tipo de manutenção, para Pinto e Xavier (2001, p.41), são:

- Maior continuidade operacional e intervenções programadas;
- Maior facilidade de gerenciamento das atividades e nivelamento de recursos;
- Previsibilidade de consumo de materiais e sobressalentes.

Já as desvantagens são as seguintes:

- Necessidade de acompanhamento do plano de manutenção montado;
- Necessidade de uma equipe de executantes eficazes e treinados;
- Possibilidade de introduzir defeitos não existentes no equipamento durante as intervenções.

Pinto e Xavier (2001, p.41) apontam possíveis causas de introdução de problemas nos equipamentos:

- Falha humana;
- Falha de sobressalentes;
- Contaminações introduzidas no sistema de óleo;
- Danos durante partidas e paradas;
- Falhas dos procedimentos de manutenção.

2.2.3 Manutenção Preditiva

Também conhecida por Manutenção Sob Condição ou Manutenção com Base no Estado do Equipamento, é definida por Pinto e Xavier (2001, p.41) como “a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática”.

Segundo a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise de sinais, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

Monchy (1989, p.35) descreve a preditiva como sendo uma “forma de

manutenção preventiva em que a lei de degradação (evolução do desgaste do equipamento) é desconhecida e a supervisão dos parâmetros de controle é realizada de forma contínua”. Quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido, é tomada a decisão de intervenção. Isto permite um melhor planejamento tanto dos recursos materiais, quanto dos recursos humanos e financeiros.

As técnicas mais utilizadas na indústria são: análise de vibração, análise termográfica, análise de emissões acústicas, análise de óleos lubrificantes e análise de sinais de corrente elétrica.

Levando-se em consideração a produção da planta, a manutenção preditiva é a mais vantajosa, pois intervém o mínimo possível e evita intervenções desnecessárias. Outra vantagem é que aproveita ao máximo a vida útil dos componentes da máquina. Porém, tudo isso exige pessoal altamente treinado e qualificado, além de equipamentos específicos, geralmente, caros. A Figura 3 representa a manutenção preditiva.

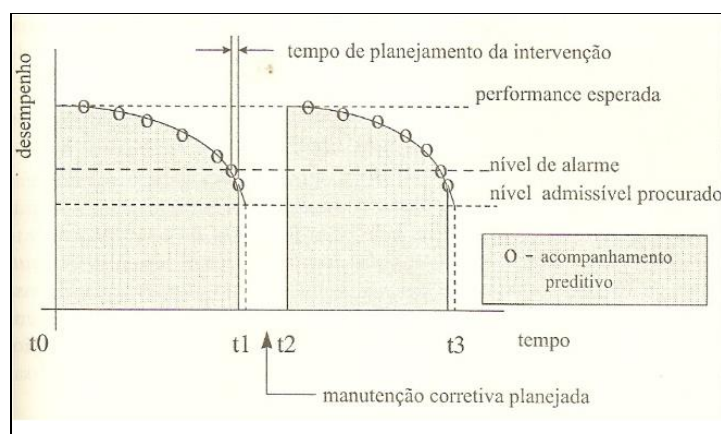


Figura 3 – Manutenção Preditiva
Fonte: Pinto e Xavier (2001)

2.2.4 Manutenção Detectiva

Surgida na década de 90, a manutenção detectiva visa à busca das chamadas falhas ocultas, aquelas falhas não evidentes para o pessoal de operação e manutenção em situação normal (PINTO e XAVIER, 2001).

Falhas ocultas ocorrem em sistemas de proteção de geração, transmissão e

distribuição de energia elétrica, nos dispositivos de segurança de processos e nos sistemas de desligamento de emergência.

A manutenção detectiva é realizada por meio de testes periódicos na função oculta, mas isto não é garantia que o dispositivo não venha a falhar durante o próximo período de funcionamento.

2.3 CONFIABILIDADE

Henley e Kumamoto foram os primeiros a desenvolverem os primeiros estudos de análise de confiabilidade, com o surgimento da indústria aeronáutica logo após a Primeira Guerra Mundial (LAFRAIA, 2001).

A indústria bélica passou a fazer estudos de Engenharia da Confiabilidade nos meados da Segunda Guerra Mundial, quando começou a desenvolver armamentos de maior complexidade e a necessitar de meios que permitissem estimar a vida ou mesmo a probabilidade de um equipamento operar com sucesso (SOUZA, 2008).

A geração de energia elétrica foi possível após o final da Segunda Guerra Mundial, com o desenvolvimento da energia nuclear. A confiabilidade começou a ser aplicada na redução da probabilidade de falha de sistemas cuja consequência seria a ocorrência de vazamentos de material radioativo e no projeto do sistema de controle de uma usina nuclear.

Na norma brasileira NBR 5462 (ABNT, 1994) a confiabilidade é definida como a “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo”.

Pinto e Xavier (2001, p.96) definem a confiabilidade como a “probabilidade que um item possa desempenhar sua função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso”. Probabilidade é um conceito da estatística e pode ser definida como a “relação entre o número de casos favoráveis e o número de casos possíveis”.

O inverso da confiabilidade seria a probabilidade do componente ou sistema falhar. Segundo Lafraia (2001, p.15), a definição de falha, no contexto da confiabilidade, é a “impossibilidade de um sistema ou componente cumprir com sua

função no nível especificado ou requerido”. Após a falha, de acordo com a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), o item entra em quebra que é definida como o “estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos”.

O comportamento de determinado produto com relação à falha é bem mais compreendido pelo exame do comportamento de sua taxa de falha $\lambda(t)$. É definida por Lafraia (2001, p.15) como a “frequência com que as falhas ocorrem, num certo intervalo de tempo, medida pelo número de falhas para cada hora de operação ou número de operações do sistema ou componente”.

O comportamento da taxa de falha $\lambda(t)$ ao longo do tempo t é indicador das causas da falha. A curva da banheira representa de maneira genérica as fases da vida de um componente, embora ela seja válida somente para componentes individuais.

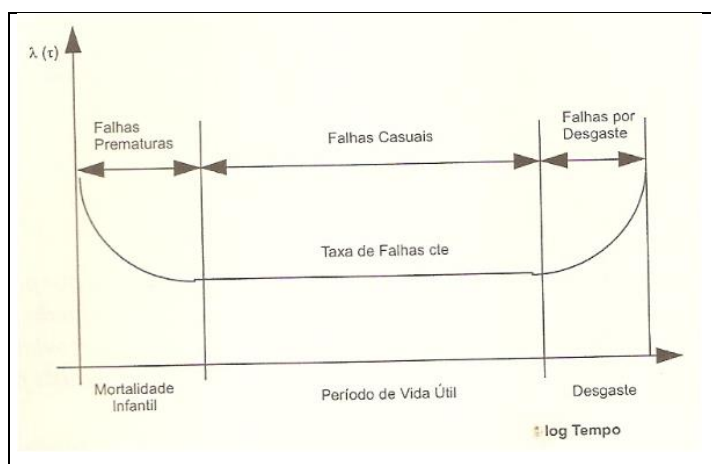


Figura 4 – Curva da Banheira
Fonte: Lafraia (2001)

Na curva, representada na Figura 4, pode-se ver que um componente apresenta três períodos de vida distintos, que são:

- **Mortalidade infantil:** ocorrem as falhas prematuras, como componentes com defeito de fabricação ou montagem inadequada. A taxa de falhas é decrescente;
- **Vida útil:** ocorrem falhas aleatórias, como fenômenos naturais imprevisíveis. A taxa de falhas é constante;

- Desgaste (envelhecimento ou degradação): ocorrem as falhas decorrentes do desgaste normal, como desgaste e fadiga. A taxa de falhas é crescente.

2.3.1 Confiabilidade de Sistemas

Sistemas são conjuntos de elementos diferentes com atributos e funções especiais que podem interagir entre eles e com o ambiente externo, em forma organizada.

Entre as ferramentas de análise de confiabilidade de sistemas, destacam-se (SOUZA e MOLINARI, 2008):

- Diagrama de Blocos;
- Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA);
- Análise de Árvore de Falhas (FTA).

Estas ferramentas apresentam vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na escolha da aplicação do método conforme o sistema em análise.

2.3.1.1 Método dos diagramas de blocos

No diagrama de blocos cada componente é representado por um bloco. Um bloco pode representar diferentes modos de falha de um mesmo componente, ou ainda, um sistema ou subsistema.

A Figura 5 demonstra as duas configurações principais: em série e em paralelo.

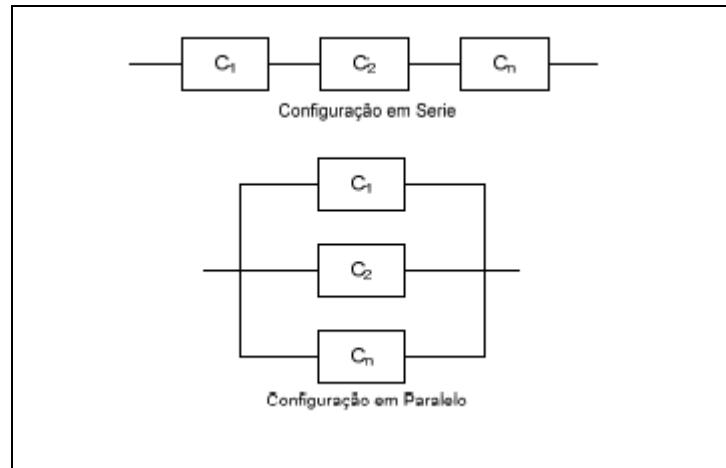


Figura 5 – Representação de blocos em série e paralelo
Fonte: Adaptado de Lafraia (2001)

Dois ou mais componentes conectados em sequência representam uma configuração em série. Quando se empregam componentes em série, deve-se atentar para dois problemas (SOUZA e MOLINARI, 2008):

- A falha de apenas um componente é suficiente para parar a operação do sistema;
- O número de componentes tem efeito negativo na confiabilidade do sistema, ou seja, o aumento do número de componentes causa um decréscimo na confiabilidade do sistema.

Dois ou mais componentes dispostos paralelamente representam uma configuração em paralelo. Têm a capacidade para executar a mesma função. Este sistema é utilizado quando se deseja aumentar a confiabilidade. A falha do sistema somente ocorrerá quando todos os componentes falharem (LAFRAIA, 2001).

2.3.1.2 Método de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA)

O Método de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*) teve origem no meio militar e, segundo Lafraia (2001, p.101) “uma técnica indutiva, estruturada e lógica para identificar e(ou) antecipar a(s)

causa(s) e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto”.

A análise resulta em ações corretivas, classificadas de acordo com sua criticidade, para eliminar ou compensar os modos de falhas e seus efeitos.

Um roteiro de perguntas básicas sobre quais maneiras um componente pode falhar é utilizado durante uma Análise de Modos e Efeitos de Falhas. São elas:

- Que tipos de falhas são observados?
- Que partes do sistema são afetadas?
- Quais são os efeitos da falha sobre o sistema?
- Qual a importância da falha?
- Como preveni-la?

À medida que estas perguntas forem sendo respondidas, são identificados todos os modos de falha de todos os componentes, quais os meios possíveis da detecção de seu desenvolvimento e qual o tipo de proteção pode ser adotado contra sua ocorrência, bem como os efeitos sobre o sistema.

Modo de falha, de acordo com Laffraia (2001), “é a descrição da maneira pela qual um item falha em cumprir com a sua função. Compreende os eventos que levam a uma diminuição parcial ou total da função do item e de suas metas de desempenho”.

Os efeitos são as consequências e podem ser facilmente confundidos com os modos de falha. Um modo de falha pode ter mais de um efeito, por isso devem ser relacionados.

Aplicações para a FMEA, segundo (LAFRAIA, 2001):

- Meio para identificar os testes necessários e os meios requeridos para certificar um projeto;
- Meio documentado de revisão de projetos;
- Sistema lógico para considerações, avaliações ou certificação de mudanças em projetos, processos ou materiais.

A Norma MIL-STD-1629A (1977) classifica a severidade da seguinte maneira:

- Catastrófica: falhas que podem causar danos fatais ou mortais;
- Crítica: falha que danifica completamente o sistema;
- Marginal: falha leve que degrada o sistema;

- Menor ou desprezível: falha que não causa ferimentos ou degradação no desempenho do sistema.

A Norma ISO 9000 também é usada para a classificação de severidades, como mostrado no Quadro 1:

1	Sem efeito	Nenhum efeito no produto ou processos subseqüentes
2	Efeito muito leve	O cliente mais provavelmente não observa a falha. Efeito muito ligeiro ou no desempenho do produto / processo. Falha não vital observada às vezes
3	Efeito leve	Cliente ligeiramente irritado. Efeito menor no desempenho do produto / processo. Falha não vital observada na maioria das vezes
4	Efeito menor	Cliente sente o menor incômodo. Efeito moderado no desempenho do produto / processo. A falha não vital observou-se sempre.
5	Efeito moderado	O cliente sente algum descontentamento. Efeito moderado no desempenho do produto / processo. A falha na parte não vital requer o reparo
6	Efeito significante	O cliente sente o desconforto. O desempenho do produto / processo degradou, mas operável e seguro. Peça não vital inoperável.
7	Efeito maior	Cliente descontente. Efeito no processo; retrabalho / reparo na parte necessária. Desempenho do produto / processo afetado severamente, mas, funciona e é seguro. Subsistema inoperante
8	Efeito extremo	O cliente muito descontente. Efeito extremo no processo; o equipamento danificou. Produto inoperável, mas, seguro. Sistema inoperável
9	Efeito sério	Efeito potencial perigoso. Capaz de parar o produto sem acidente; segurança relacionada; falha dependente do tempo. Rompimento às operações do processo subseqüente. O cumprimento com regulamento do governo está sob risco.
10	Efeito perigoso	Efeito perigoso. Segurança relacionada, falha repentina. Sem cumprimento com regulamento do governo.

Quadro 1 – Classificação de severidade conforme a norma ISO 9000
Fonte: Souza (2008)

2.3.1.3 Método de Análise de Árvore de Falhas (FTA)

O Método de Análise de Árvore de Falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*) foi desenvolvido no início dos anos 60 por W. A. Watson, da empresa *Bell Laboratories*

e aperfeiçoada pela empresa *Boeing Corporation* e tornou-se uma das principais técnicas para avaliação da confiabilidade de sistemas.

Pode ser uma análise tanto qualitativa quanto quantitativa. Segundo Lafraia (2001, p.123), “na análise qualitativa, o objetivo pode ser determinar as causas básicas de um evento ou a seqüência que levou ao mesmo. Na análise quantitativa, o objetivo é determinar a probabilidade de ocorrência do evento”.

A FTA tem como objetivo melhorar a confiabilidade de componentes ou sistemas mediante a análise sistemática de possíveis falhas e suas conseqüências, apontando as medidas necessárias tanto para correção quanto para prevenção.

Uma vantagem muito importante deste método é o conhecimento técnico adquirido dos componentes e sistemas, bem como a melhor interação entre os colaboradores envolvidos nas análises.

Principais objetivos da Análise de Árvore de falhas (LAFRAIA, 2001):

- Conhecimento aprofundado do sistema e de sua confiabilidade;
- Detecção de falhas singulares (aquelas cuja ocorrência leva ao evento topo) desencadeadoras de eventos catastróficos e da seqüência de eventos mais prováveis;
- Possibilita decisões de tratamento de riscos baseados em dados quantitativos;
- Pode ser realizada em diferentes níveis de complexidade;
- Ótimos resultados podem ser conseguidos apenas com a forma qualitativa;
- Complementa-se com a FMEA;
- Permite a determinação de falhas potenciais que seriam difíceis de serem detectadas;
- Permite a determinação de partes críticas para teste de produtos;
- Excelente ferramenta de comunicação visual;
- Ajuda da determinação da causa de falhas e possibilita verificar a interação entre as causas.

Os principais passos para a construção de uma análise do tipo FTA, são:

- Definir o sistema, o evento topo (acidente potencial), e as condições limites;

- Construção da árvore de falhas;
- Identificação dos conjuntos de cortes mínimos;
- Análise qualitativa da árvore de falhas;
- Análise quantitativa da árvore de falhas;
- Registro dos resultados.

Para a construção de uma FTA são utilizados símbolos e comportas lógicas para descrever eventos, conexões lógicas e símbolos de transferência. Estes símbolos estão demonstrados nas Figuras 6, 7 e 8.

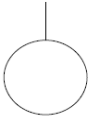
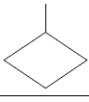
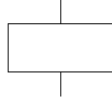

Símbolo	Significado
	O círculo representa um evento base na árvore. Eles se encontram nos níveis inferiores da árvore e não requerem mais desenvolvimento ou divisões. Não há portas ou eventos debaixo do evento base.
	O diamante identifica um evento terminal sem desenvolver. Tão evento não é completamente desenvolvido devido a uma falta de informação.
	O retângulo é o principal componente básico da árvore. Representa o evento negativo e se localiza no ponto superior da árvore e pode localizar-se por tudo a árvore para indicar outros eventos que podem dividir-se mais. Este é o único símbolo que terá abaixo uma porta lógica e eventos de entrada.
	Este símbolo representa uma situação especial que pode ocorrer somente se ocorrerem certas circunstâncias. Isso se explica adentro do símbolo.

Figura 6 – Símbolos de eventos da FTA
Fonte: Adaptado de Lafraia (2001)

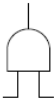

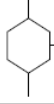
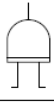

Símbolo	Nome	Significado
	E	Evento de saída só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrem simultaneamente.
	OU	Evento de saída só ocorrerá se somente um ou qualquer combinação dos eventos de entrada ocorre
	E de prioridade	Evento de entrada só conduz ao evento de saída se o condicional ocorrer
	OU exclusiva	Evento de saída ocorre se os eventos de entrada ocorrer na ordem de esquerda para direita
	Inibição condicional	Evento de saída ocorre se só um evento de entrada ocorrer

Figura 7 – Conectores lógicos da FTA
Fonte: Adaptado de Lafraia (2001)



Símbolo	Significado
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Para fora</div>  </div>	Uma linha a partir do vértice do triângulo indica a transferência de entrada, e uma linha do lado denota uma transferência para fora
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">Para dentro</div>  </div>	

Figura 8 – Símbolos de transferência da FTA
Fonte: Adaptado de Lafraia (2001)

Uma árvore de falhas é uma representação gráfica organizada das condições que contribuem para ocorrência de falhas de um evento definido, chamado de evento topo. Uma típica árvore de falhas consiste de um evento topo, eventos básicos e portas lógicas. O evento topo representa uma condição indesejada do sistema, os eventos básicos representam os estados dos componentes do sistema, e as portas lógicas descrevem o comportamento entre os eventos básicos e o evento topo.

A Figura 9 mostra o funcionamento da porta lógica “OU”. Para que ocorra um evento topo é necessário que ocorra um evento básico, independente um do outro. Na forma de diagrama de blocos a porta “OU” é representada por uma formação em série.

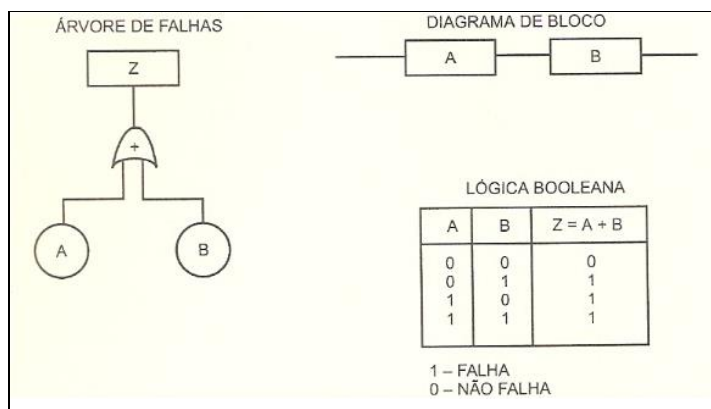


Figura 9 – Porta lógica “OU”
Fonte: Lafraia (2001)

A Figura 10 mostra o funcionamento da porta lógica “E”. Para que ocorra um evento topo é necessário que todos os eventos básicos ocorram simultaneamente. Na forma de diagrama de blocos a porta “E” é representada por uma formação em paralelo.

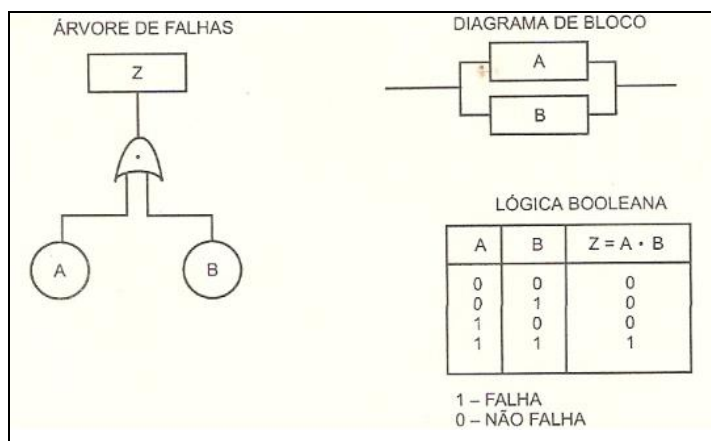


Figura 10– Porta lógica “E”
Fonte: Lafraia (2001)

2.3 DISPONIBILIDADE

Para Pinto e Xavier (2001, p.101), disponibilidade pode ser conceituada numa primeira abordagem “como sendo o tempo em que o equipamento, sistema ou instalação está disponível para operar ou em condições de produzir”.

O conceito de “disponibilidade instantânea” é apresentado por Lafraia (2001, p.197) como a “probabilidade de que um sistema esteja em condição operacional no

instante t ".

Kardec e Lafraia (2001, p.77), também definem a disponibilidade como "a confiança de que um componente ou sistema que sofreu manutenção exerça sua função satisfatoriamente para um dado tempo". Para componentes de operação contínua, significa o percentual de tempo em que o sistema estava pronto para operar. Já para os componentes reservas, é a confiança de que irão operar quando solicitados.

2.4 MANTENABILIDADE

A maioria dos sistemas passa por manutenção, são reparados quando falham. A facilidade com que se efetuam reparos e outras atividades de manutenção determina a manutenibilidade de um sistema.

Lafraia (2001, p.161), sob o ponto de vista matemático, define manutenibilidade como a "probabilidade do equipamento ser colocado em condições de operação dentro de um dado período de tempo quando a ação de manutenção é executada de acordo com os procedimentos prescritos".

A manutenibilidade é uma característica de projeto que define a facilidade de manutenção, o tempo de manutenção, os custos e as funções que o item executa. Kardec e Lafraia (2001, p.78) apontam que "é mais fácil atuar sobre a manutenibilidade do que sobre a confiabilidade para aumentar a disponibilidade". Isso porque demanda menor investimento financeiro e maior planejamento e logística.

O projeto deve estar sempre atento para os aspectos ligados a acesso e facilidades para a manutenção. Pinto e Xavier (2001, p.109) destacam que "além do projeto do equipamento, a definição do leiaute e a instalação do equipamento são de capital importância para o aspecto da manutenibilidade".

A disponibilidade é afetada diretamente pela manutenibilidade, pois o tempo gasto para reparar falhas e executar manutenção sistemática, retira o sistema do estado disponível.

3 AMBIENTE EXPLORADO

Este capítulo tem a finalidade de mostrar, de maneira resumida, o processo de fabricação de cimento, bem como situar o resfriador de grelhas, objeto deste estudo, no fluxograma de processo.

A Figura 11 mostra as distintas fases de fabricação de cimento e dá a ideia de posicionamento de cada equipamento no processo produtivo.

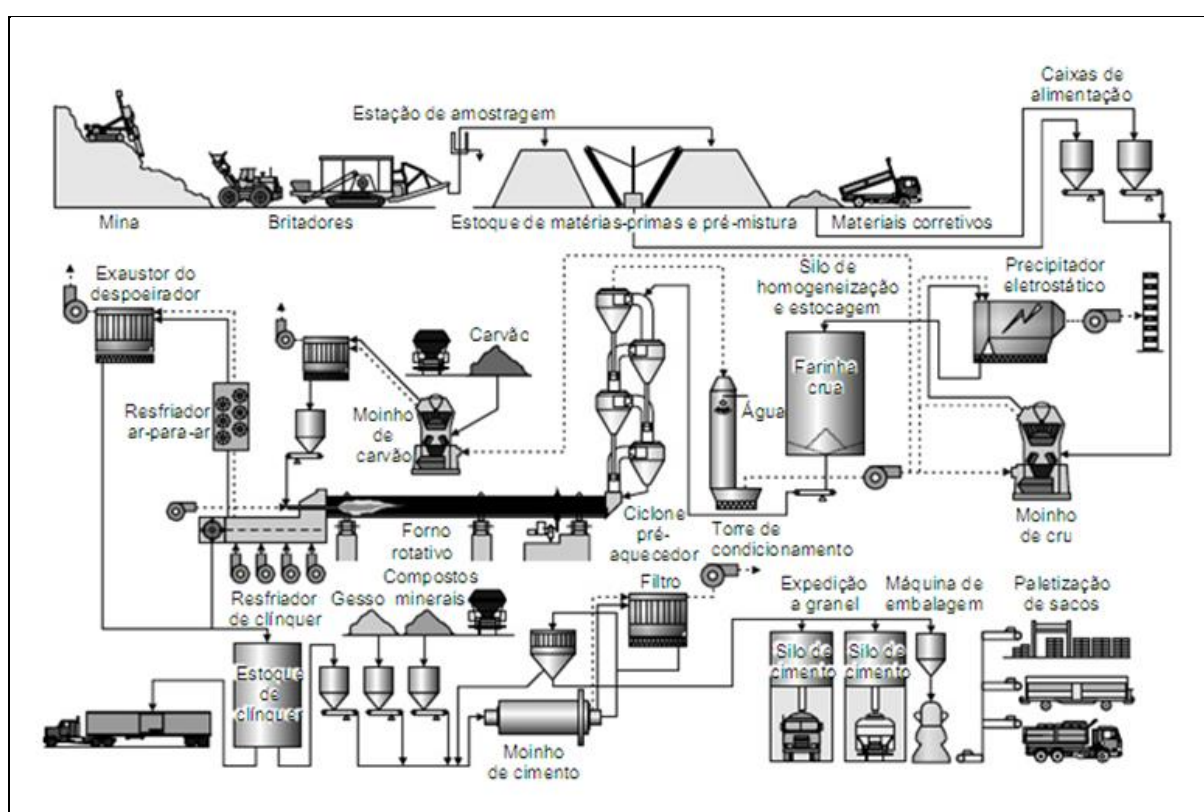


Figura 11– Fluxograma do processo de produção de cimento

Fonte: Itambé (2000)

3.1 MINERAÇÃO, EXTRAÇÃO E PRÉ-HOMOGENEIZAÇÃO

Os blocos de calcário são extraídos da jazida e depois passam por um grande britador de martelos para diminuir sua granulometria (Figura 12). Além do calcário, também são extraídos a argila e a areia arcossiana (Figura 13).

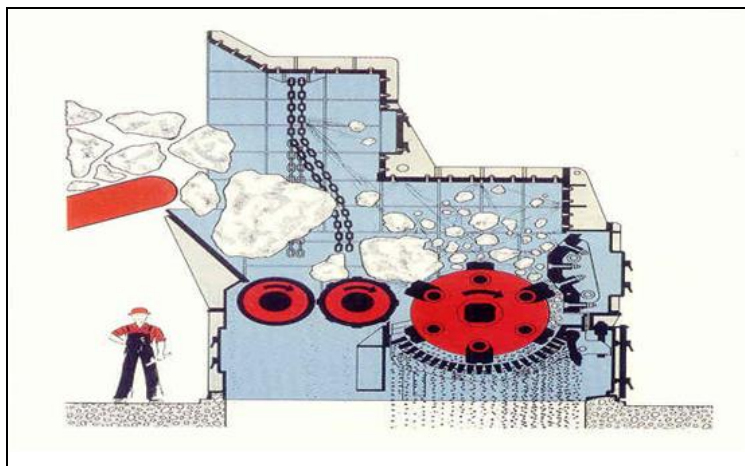


Figura 12 – Vista esquemática de um britador de martelos
Fonte: Itambé (2000)

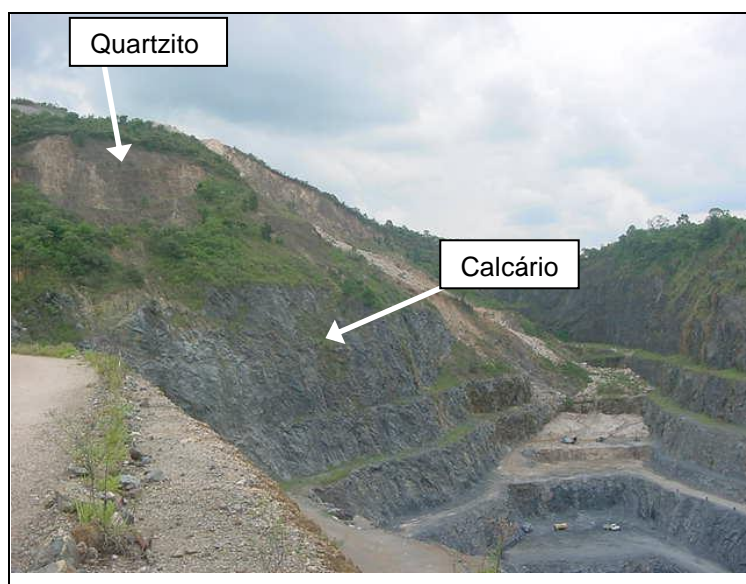


Figura 13 – Vista do morro de quartzito com o calcário na parte inferior
Fonte: O autor

Após a extração e britagem, essas matérias primas são transportadas até a fábrica por caminhões basculantes para serem armazenadas e homogeneizadas. A pré-homogeneização é necessária para garantir a uniformidade da matéria-prima a ser utilizada.

3.2 MATÉRIAS PRIMAS E MOAGEM DE CRÚ

Nesta etapa o calcário, juntamente com as matérias primas argila, quartzito e minério de ferro, é moído no moinho de cru. O produto desta moagem é a farinha crua, que mais adiante, após ação de calor, se transformará no clínquer.

3.3 SECAGEM E HOMOGENEIZAÇÃO DA FARINHA CRUA

A secagem da farinha crua se dá pelo aproveitamento dos gases quentes residuais provenientes do forno. A finalidade dos equipamentos de homogeneização de farinha crua é de fornecer ao forno uma alimentação de composição química e finura constantes.

3.4 PRÉ-AQUECIMENTO E PRÉ-CALCINAÇÃO

Na torre de ciclones (pré-aquecimento) ocorre a troca térmica entre os gases oriundos do forno (ascendente) e a farinha crua alimentada (descendente). A farinha permanece no pré-aquecedor por cerca de 20 segundos em média, sendo que sua temperatura ultrapassa os 850 °C.

O pré-calcinador tem a finalidade de descarbonatar a maior parte da farinha crua que alimentará o forno e isto ocorre por meio de 4 maçaricos que injetam coque no sistema. Quando as partículas de combustível são queimadas o calor desenvolvido é transmitido instantânea e homogeneamente para as partículas da farinha crua, permitindo uma eficiência de até 90% de descarbonatação na entrada do forno.

A Figura 14 mostra o fluxo de entrada da farinha e da circulação de gases.

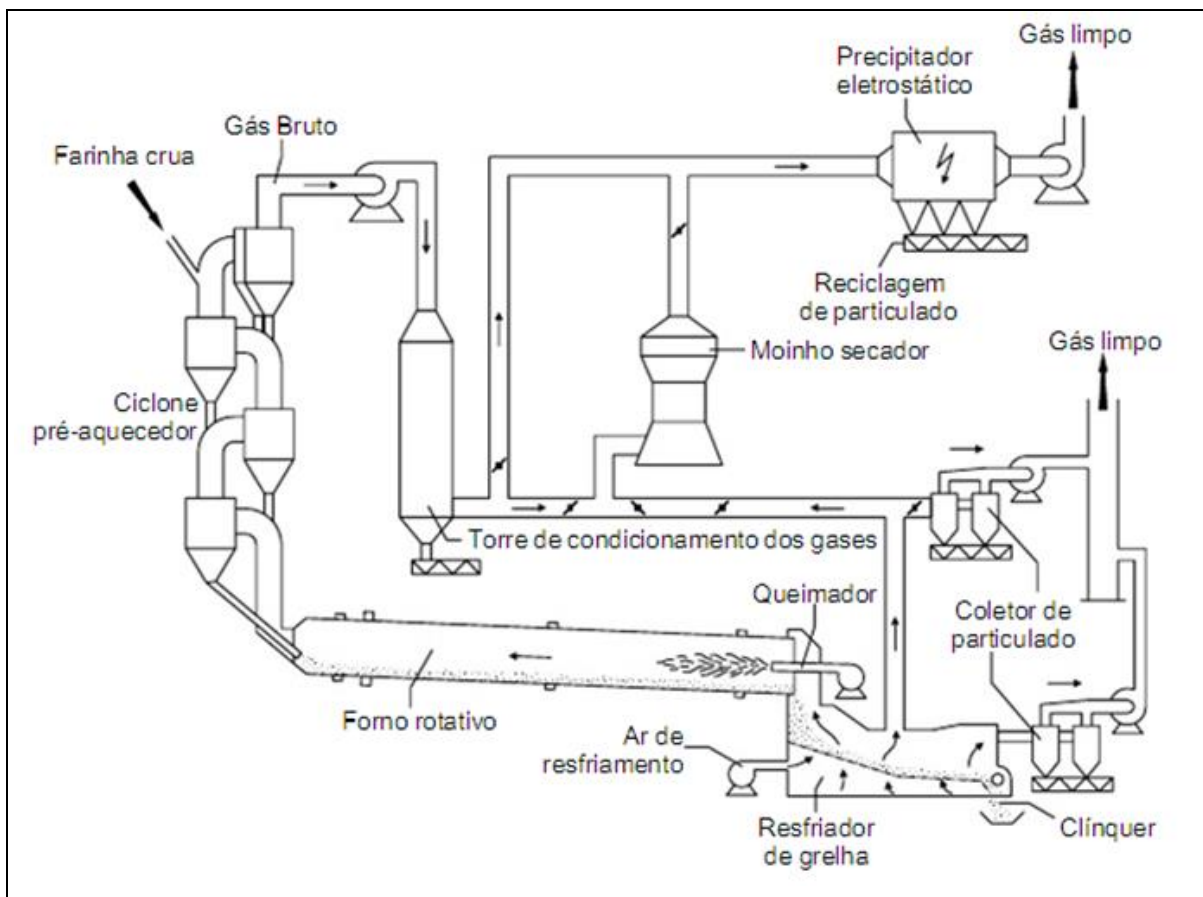


Figura 14 – Forno rotativo com ciclone pré-aquecedor
 Fonte: Itambé (2000)

3.5 CLINQUERIZAÇÃO

O clínquer é um produto intermediário na produção do aglomerante hidráulico conhecido como Cimento *Portland* e pode ser considerado uma rocha produzida sinteticamente, proveniente da reação de clinquerização que ocorre a aproximadamente 1500°C. Clinquerização é o nome dado ao tratamento térmico de aquecimento e resfriamento responsável por essa transformação.

Ainda no interior do forno, logo após a chama, o clínquer recebe o primeiro resfriamento. Do forno o material cai no resfriador Folax (de grelhas) a uma temperatura de aproximadamente 1200 a 1250°C, onde recebe o segundo resfriamento (Figura 15). O clínquer deve ser resfriado rapidamente para permitir seu transporte e manuseio e também para garantir sua qualidade e moabilidade. O resfriador é dividido em câmaras de ventilação onde cada uma possui um ventilador

próprio. O ar é impulsionado na parte inferior da câmara atravessando as placas das grelhas e, conseqüentemente, a camada de clínquer que cobre essas placas. Este processo também permite a recuperação de calor do clínquer de volta ao forno pelo pré-aquecimento do ar utilizado para a combustão no queimador principal e em qualquer queima secundária (Figura 15). O ar secundário é o ar de combustão, que influencia diretamente na direção da chama do maçarico do forno. O ar terciário carrega material particulado, que, após ser filtrado, segue para o pré-calcinador para auxiliar na combustão. O ar de excesso (ou de exaustão) é filtrado antes de ser liberado para a atmosfera. Também é utilizado para secagem de matéria prima e de combustíveis. A Figura 16 demonstra como o ar de resfriamento se distribui, bem como, sua utilização.

Após o resfriamento brusco, por volta de 90°C, o clínquer é transportado até o pavilhão de clínquer onde ocorre o final do resfriamento e o armazenamento.

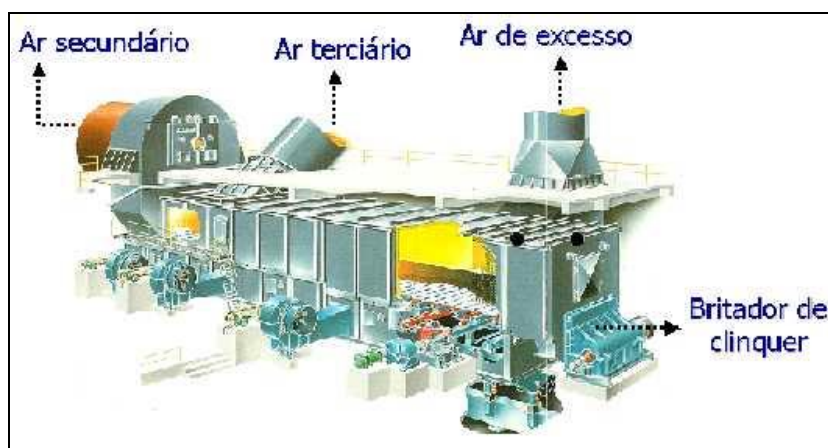


Figura 15 – Vista esquemática de um resfriador de grelhas
Fonte: Itambé (2000)

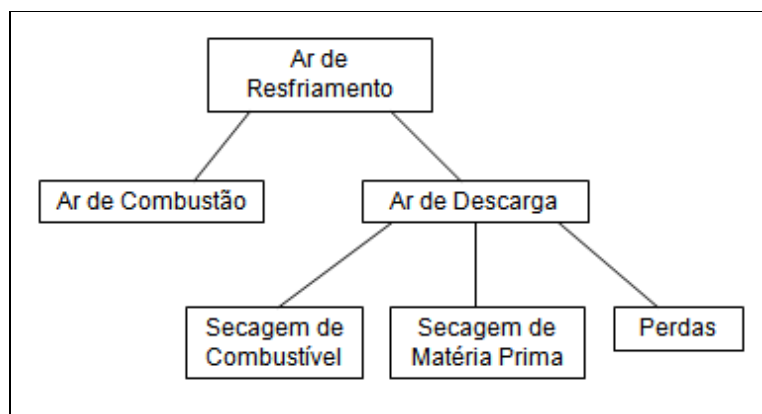


Figura 16 – Esquema de distribuição do ar de resfriamento
Fonte: Autoria própria.

3.6 MOAGEM DE CLÍNQUER E ADIÇÕES

O clínquer e o gesso são enviados para o moinho de bolas, onde são moídos conjuntamente, formando o cimento *portland*. Outros tipos de cimento são produzidos com a adição de cinza pozolânica e do filler calcário.

3.7 ARMAZENAGEM E EXPEDIÇÃO

Os diferentes tipos de cimento são armazenados em silos separadamente. A expedição do cimento ocorre por meio de duas maneiras: a granel (caminhões tanques) e ensacado.

4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Como já foi abordado anteriormente no tópico 1.4.1, o objetivo deste trabalho é elaborar um estudo de confiabilidade de um resfriador de grelhas utilizado em indústrias de cimento. O Anexo A trata sobre resfriamento de clínquer e aborda os diferentes tipos de resfriadores existentes, inclusive o resfriador Folax, objeto deste estudo.

O trabalho está dividido em dois períodos: de 1998 a 2004 e de 2005 a 2011.

Primeiramente buscaram-se no histórico do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) as paradas não programadas (corretivas) dos períodos citados acima. Deste levantamento foram levantados os Modos de Falha dos equipamentos do Sistema Resfriamento de Clínquer, que se encontra no Apêndice A.

A partir destes Modos de Falha foi elaborada uma análise com base no formulário FMEA / FMECA (Apêndice B), que culminou na revisão dos planos de manutenção e alteração da composição das grelhas.

Os cenários apresentados abaixo mostram as etapas executadas a partir da análise citada acima.

4.1 CENÁRIO ANTES DAS MELHORIAS

A Tabela 1 mostra que no primeiro período o forno parou 113 vezes, durante 1.192,45 horas. Das 113 paradas, 40 foram provenientes do resfriador, ou seja, 35,40%. Ou ainda, das 1.192,45 horas paradas, 388,73 foram provenientes do resfriador, ou seja, 32,60%. Levando-se em consideração que 1 hora de forno parado gera um prejuízo de R\$ 56.000,00, pode-se dizer que neste período as horas paradas do forno por problemas no resfriador geraram um prejuízo na ordem de R\$ 21.768.880,00.

Tabela 1 – Estratificação de Paradas do Forno e Resfriador (1998 a 2004)

Ano	Paradas Totais do Forno		Paradas Totais do Resfriador	
	Nº de Paradas	Horas Paradas	Nº de Paradas	Horas Paradas
1998	11	130,89	4	57,30
1999	21	89,13	10	49,01
2000	21	208,42	12	117,13
2001	36	453,44	3	11,51
2002	11	51,05	3	7,21
2003	6	46,09	3	21,43
2004	7	213,43	5	125,14
Total	113	1192,45	40	388,73

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 2 demonstra a política de manutenção adotada neste período, tanto para o resfriador quanto para os equipamentos periféricos. As inspeções visuais (semanais) são executadas com o equipamento em funcionamento. Já as manutenções preventivas (semestrais) são executadas com equipamento parado durante as paradas programadas do forno.

Equipamento	Tipo de Manutenção	Descrição do Serviço	Periodicidade	Executante
W2K01 (resfriador)	1. Inspeção Visual	1.1 Inspeção nos acionamentos das grelhas, bielas e vedações 1.2 Inspeção nas válvulas de finos 1.3 Lubrificação das rodas de apoio e bielas	Semanal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Inspeção nas placas do IKN e medição de espessura 2.2 Levantamento das grelhas a serem trocadas 2.3 Inspeção na cortina de corrente 2.4 Inspeção nas vigas transversais	Semestral	Inspetor Técnico
	3. Preventiva	3.1 Troca de grelhas 3.2 Revisão dos acoplamentos, rodas de apoio e bielas 3.3 Revisão das válvulas de finos	Semestral	Mecânico
W2K10 a W2K16 (ventiladores)	1. Inspeção Visual	1.1 Medir vibração com caneta de vibração 1.2 Medir temperatura dos mancais 1.3 Inspeção na fixação do acionamento e mancais	Mensal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Abertura de mancais e inspeção nos rolamentos 2.2 Inspeção nas polias e correias de acionamento 2.3 Inspeção e limpeza do rotor	Semestral	Mecânico
	3. Preditiva	3.1 Medição de vibração e temperatura	Mensal	Inspetor Técnico
W2K08 (cadeia arrastadora)	1. Inspeção Visual	1.1 Inspeção no acionamento quanto a fixação, ruído e temperatura 1.2 Lubrificação dos mancais	Semanal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Inspeção nos rodados de acionamento e retorno 2.2 Inspeção na corrente de arraste 2.3 Inspeção nas chapas e placas de sacrifício	Semestral	Inspetor Técnico
	3. Preventiva	2.1 Abertura de mancais e inspeção nos rolamentos 2.3 Inspeção no acionamento e conferência do alinhamento	Semestral	Mecânico
	3. Preditiva	3.1 Medição de vibração e temperatura	Mensal	Inspetor Técnico
W2M01 (britador)	1. Inspeção Visual	1.1 Inspeção no acionamento quanto a fixação, ruído e temperatura, 1.2 Lubrificação dos mancais	Semanal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Inspeção no rotor e martelos 2.2 Inspeção na placa de sacrifício 2.3 Inspeção nas chapas de revestimento da carcaça	Semestral	Inspetor Técnico
	3. Preventiva	3.1 Abertura de mancais e inspeção nos rolamentos 3.2 Inspeção nas polias e correias de acionamento 3.3 Recuperação / troca das chapas de revestimento	Semestral	Mecânico
	4. Preditiva	4.1 Medição de vibração e temperatura	Mensal	Inspetor Técnico

Quadro 2 – Plano de manutenção para o resfriador e equipamentos periféricos (1998 a 2004)
Fonte: Autoria própria.

No resfriador (W2K01) as placas de grelha eram trocadas após inspeção criteriosa quanto a trincas, desgaste ou deformação por temperatura excessiva (Figuras 17 e 18). Como já foi visto anteriormente, a região de caída de clínquer no resfriador é a de maior temperatura e, conseqüentemente, onde ocorre maior troca de grelhas. Percebeu-se que as grelhas usadas que permaneciam nesta região deterioravam-se antes da próxima parada programada e também comprometiam as grelhas novas instaladas.

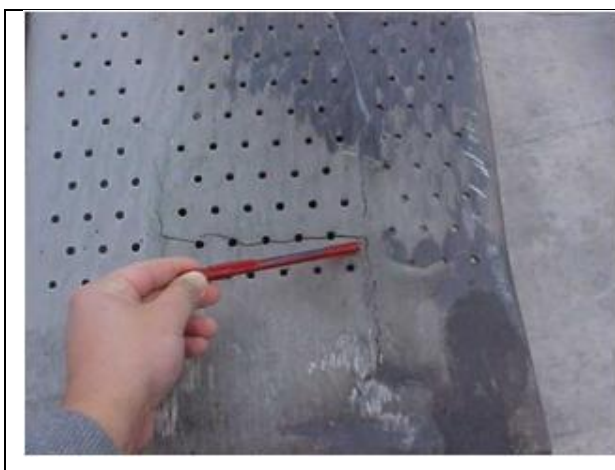


Figura 17 – Grelha trincada
Fonte: Autoria própria.

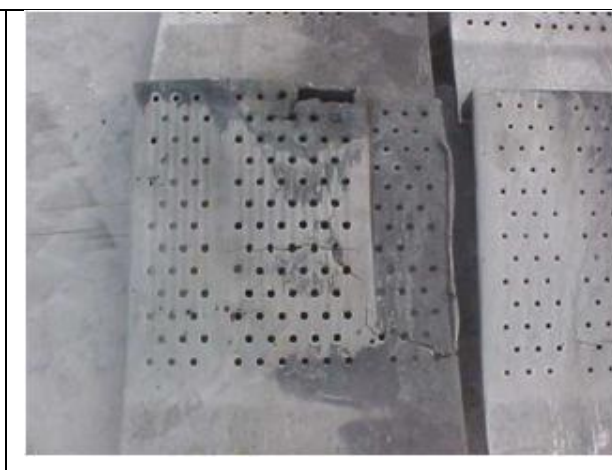


Figura 18 – Grelha deformada
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 1 mostra o número de grelhas trocadas anualmente, referente ao período de 1998 a 2004, perfazendo um total geral de 2.184 peças.

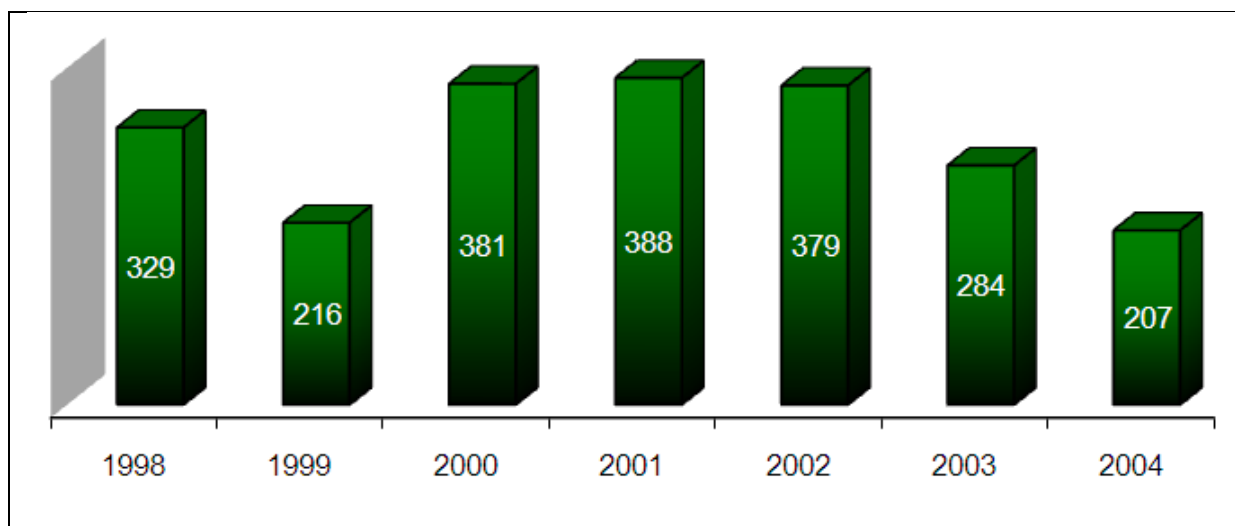


Gráfico 1 – Trocas anuais de grelhas do resfriador (1998 a 2004)
Fonte: Autoria própria

Outro fator interessante ocorria com os ventiladores. Mesmo que as análises de vibração não apresentassem qualquer tipo de anomalia como, folga de mancais e rolamentos, desalinhamento do conjunto ou desbalanceamento do rotor, em toda parada programada eram abertos os mancais para conferência da folga dos rolamentos. Algumas vezes ocorreu de ter que trocar os rolamentos ou eixo quebrado logo após a posta em marcha novamente, devido a introdução de problema onde não existia.

4.2 CENÁRIO APÓS AS MELHORIAS

As principais melhorias executadas ao longo do segundo período foram as seguintes:

- a. Nivelamento, alinhamento e revisão do sistema de acionamento (rodas de apoio e de guia);
- b. Vedação das câmaras de ar;
- c. Reforma do chassi com troca das vigas longitudinais e transversais;
- d. Padronização da montagem das grelhas, conforme orientação do fabricante (folgas laterais e frontais);
- e. Usinagem do assento e das laterais da grelha;
- f. Padronização da composição química das grelhas (material HK ou 25/20);
- g. Alteração da geometria das grelhas para ajudar na formação de camada de proteção contra o efeito do "rio vermelho";
- h. Aplicação de revestimento por aspensão térmica (*arc spray*);
- i. Troca de todas as 64 grelhas da câmara 1, independente do estado, e remanejamento das grelhas boas para as câmaras subseqüentes.

No item a foi substituído conjunto de acionamento da grelha 3, devido às deformações no braço e desgaste dos componentes, que geravam folgas no assentamento da pista externa da rótula. Essas folgas provocavam impacto cíclico que levavam ao rompimento dos tirantes de fixação. Revisão no sistema de lubrificação centralizada e troca das rodas de apoio e suportes das mesmas.



Figura 19 – Braço de acionamento da grelha deformado
Fonte: Autoria própria.



Figura 20 – Suporte e braço de acionamento novo
Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 mostra a vista parcial de um braço de acionamento (biela) das grelhas. Pode-se verificar a deformação da pista externa de assentamento da rótula proveniente de sobrecarga no acionamento. A Figura 20 mostra o novo suporte e o novo braço de acionamento.

A Figura 21 mostra uma vista geral do acionamento das grelhas com seu sistema de lubrificação. A Figura 22 mostra a vista de um suporte das rodas de apoio, que fica na parte inferior do resfriador, e auxilia na movimentação das grelhas.



Figura 21 – Acionamento da grelha
Fonte: Autoria própria.

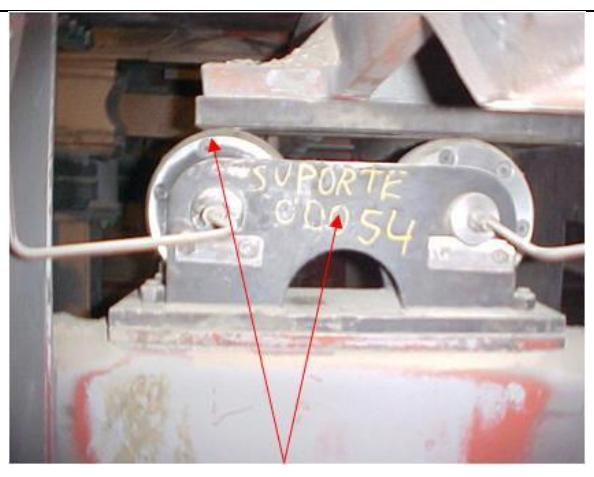


Figura 22 – Suporte e rodas de apoio
Fonte: Autoria própria.

Percebeu-se vazamento de material entre as câmaras de ar (item b) e

passagem de ar, provocando a queda de eficiência dos ventiladores. Por isso foi recuperada toda a vedação das câmaras de ar.



Figura 23 – Folga entre vedação e viga
Fonte: Autoria própria.



Figura 24 – Chapa de vedação entre câmaras
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 23 pode-se perceber a folga existente entre a vedação e a viga longitudinal que promovia a queda de eficiência de refrigeração. As Figuras 24 e 25 mostram as novas chapas de vedação entre as câmaras e na região de fixação das grelhas.

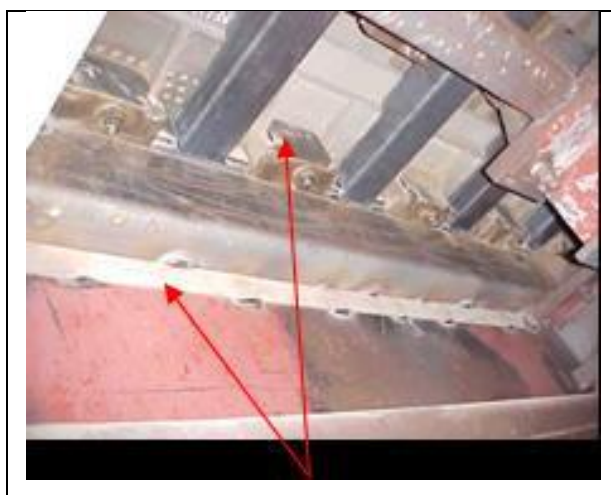


Figura 25 – Chapa de vedação na região de fixação das placas
Fonte: Autoria própria.

Por motivo de desalinhamento e sobrecarga nos acionamentos das grelhas foi feito a reforma completa do chassi do resfriador, com troca das vigas longitudinais e

transversais, conforme descrito no item c.



Figura 26 – Vigas centrais desgastadas
Fonte: Autoria própria.



Figura 27 – Vigas centrais novas
Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 mostra a vista superior das vigas “U” centrais da câmara 1 deformadas pela sobrecarga. A Figura 27 mostra as vigas “U” novas, que possibilitam uma melhor vedação e facilidade para a troca das grelhas.

A Figura 28 mostra o desgaste acentuado da viga transversal proveniente da passagem de ar por entre as vedações. Na Figura 29 pode-se ver a viga transversal nova.



Figura 28 – Viga transversal fixa deformada
Fonte: Autoria própria.



Figura 29 – Viga transversal fixa nova
Fonte: Autoria própria.

Percebeu-se que a abertura entre grelhas centrais e as placas laterais estava muito superior (Figura 30), reduzindo a eficiência de resfriamento. Para melhorar o

ajuste de montagem foi consultado o manual do fabricante do resfriador para ver se existia alguma orientação quanto à folga entre grelhas (item d).

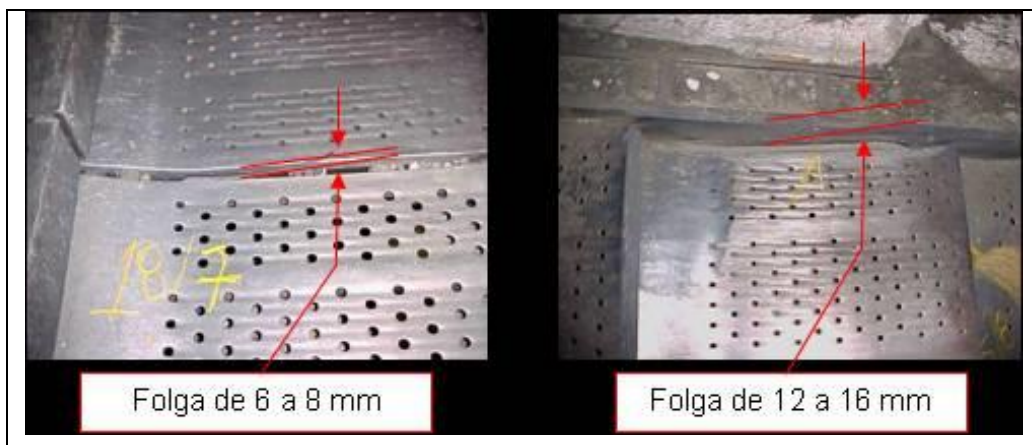


Figura 30 – Folga entre grelhas centrais e laterais
Fonte: Autoria própria.

Conforme orientação do fabricante foi elaborado um gabarito de 3 mm para fazer a regulagem das folgas laterais (Figura 31) e de uma barra de aço inox para regulagem da folga frontal (Figura 32), evitando retrabalho e reduzindo tempo de manutenção.

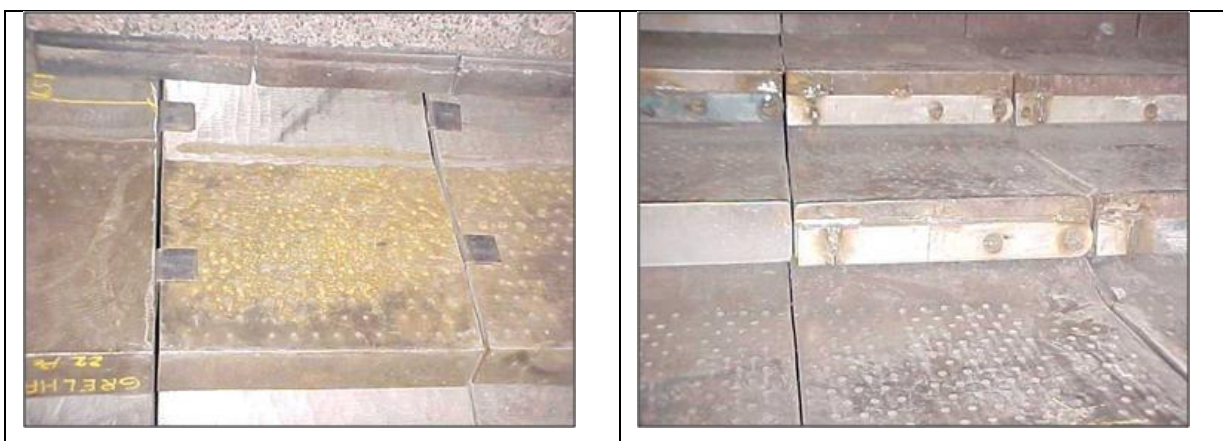


Figura 31 – Gabarito de ajuste da folga lateral
Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Barra de ajuste da folga frontal
Fonte: Autoria própria.

Outra dificuldade encontrada na montagem das grelhas se dava pela irregularidade das superfícies de assento e contato das grelhas, uma vez que são fundidas. Para isto foi desenvolvido um fornecedor de grelhas que, após a fundição, fizesse a usinagem das laterais e do assento da grelha (item e), conforme Figuras

33 e 34.



Figura 33 – Grelha com as laterais usinadas
Fonte: Aatoria própria.



Figura 34 – Grelha com o assento usinado
Fonte: Aatoria própria.

Analisando as grelhas trocadas percebeu-se que a maioria se deteriorava por temperatura excessiva. E isto ocorria na região de formação do “rio vermelho”, que é o deslocamento de material ainda quente pelas grelhas do resfriador (isto pode ser visto com mais detalhes no Anexo A, Figura 46). Por isso decidiu-se alterar a composição química e a forma construtiva da grelha de modo a atenuar a incidência de queima da mesma por redução de camada (item f). O material padronizado foi o aço refratário HS-40 (SAE A297 Gr HK ou DIN 14848 Gx 40/CrNiSi 25-20). Decidiu-se por fazer um rebaixo na placa lateral com o objetivo de aumentar a camada de material sobre a grelha, evitando que as mesmas sofram deformação por alta temperatura (Figuras 35 e 36).



Figura 35 – Grelha com rebaixo e sem revestimento em “X”
Fonte: Aatoria própria.

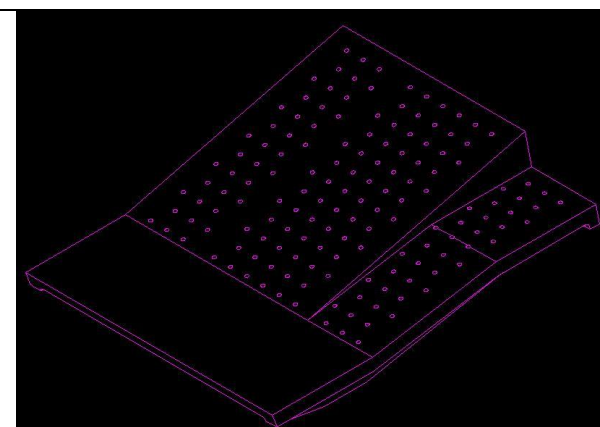


Figura 36 – Desenho esquemático da grelha com rebaixo e sem revestimento em “X”
Fonte: Aatoria própria.

Depois foi confeccionada a grelha com um revestimento em forma de “X” para aumentar a resistência, com o furo de passagem de ar no centro (vale), conforme a Figura 37. Em seguida foi decidido mudar a posição do furo para o pico, para que no centro acumulasse material e protegesse a placa contra altas temperaturas (Figuras 38 e 39).

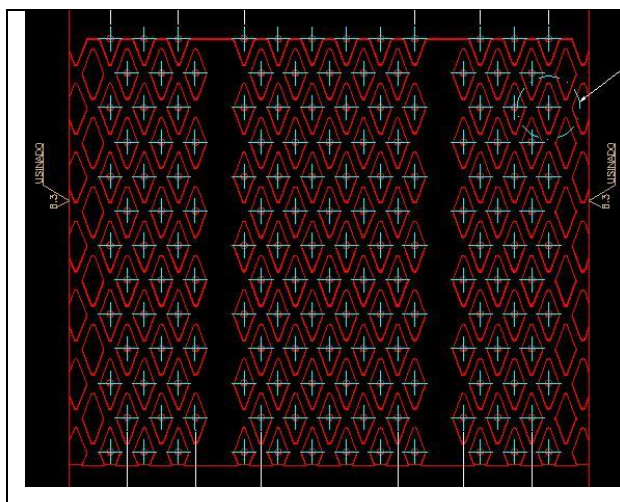


Figura 37 – Grelha com revestimento em “X” e furos centrais (vale)
Fonte: Autoria própria.

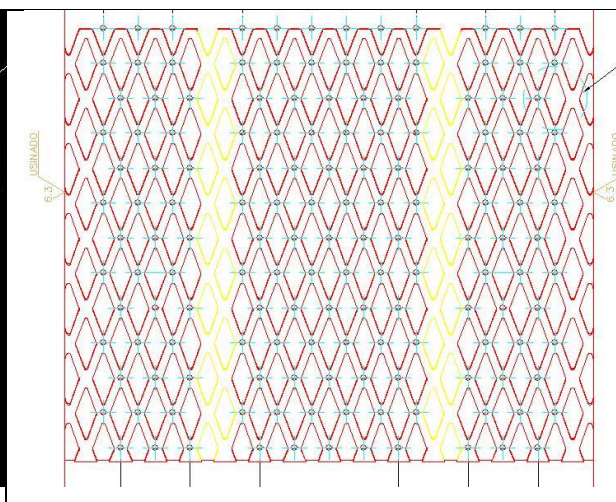


Figura 38 – Grelha com revestimento em “X” e furos no pico
Fonte: Autoria própria.

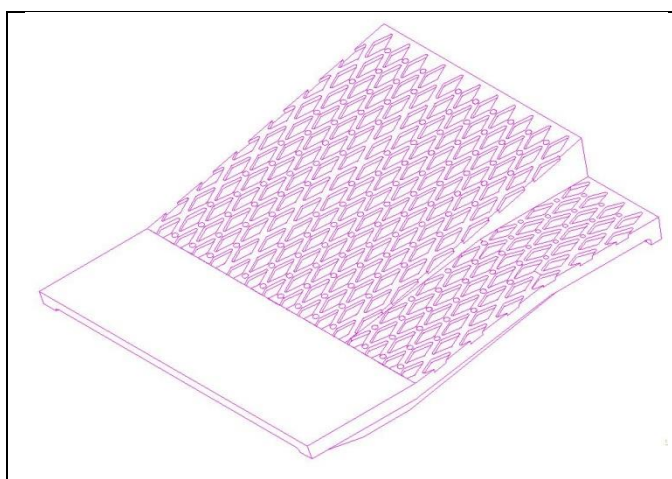


Figura 39 – Desenho esquemático da grelha com revestimento em “X” e furos no pico
Fonte: Autoria própria.

Outra melhoria adotada e que trouxe muito resultado foi a aplicação de revestimento *Arc Spray* ([item h](#)), que é um processo de aspensão térmica onde dois arames são fundidos por um arco elétrico. Esse material fundido é projetado por ar comprimido para a peça, possibilitando assim altas taxas de deposição e alta

eficiência no revestimento (Figura 40).



Figura 40 – Revestimento de grelha com *arc spray*
Fonte: Eutectic (2012).

Para evitar o problema de montar na câmara 1 (região de maior temperatura) grelhas usadas com grelhas novas e, assim, reduzir a vida útil das mesmas, adotou-se a seguinte política de troca de grelhas: nas 8 primeiras fileiras (total de 64 peças), independente da condição das grelhas estarem boas ou não, serão montadas grelhas novas com revestimento *arc spray* (Figura 41 – a parte escura representa as grelhas com revestimento). As grelhas que ainda estiverem boas serão remanejadas para as câmaras subseqüentes e as que estiverem deterioradas serão encaminhadas para descarte.

GRELHA 1									
14	H 12		H 10		H 8		H 6		
14	E	DD	E	DD	E	DD	E	DD	1 7
14	1 13	1 12	1 11	1 10	1 9	1 8	1 7	1 6	2 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	3 7
14	2 13	2 12	2 11	2 10	2 9	2 8	2 7	2 6	4 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	5 7
14	3 13	3 12	3 11	3 10	3 9	3 8	3 7	3 6	6 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	7 7
14	4 13	4 12	4 11	4 10	4 9	4 8	4 7	4 6	8 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	9 7
14	5 13	5 12	5 11	5 10	5 9	5 8	5 7	5 6	10 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	11 7
14	6 13	6 12	6 11	6 10	6 9	6 8	6 7	6 6	12 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	13 7
14	7 13	7 12	7 11	7 10	7 9	7 8	7 7	7 6	14 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	15 7
14	8 13	8 12	8 11	8 10	8 9	8 8	8 7	8 6	16 7
	E	DE	E	DE	E	DE	E	DE	17 7
14	8 13	8 12	8 11	8 10	8 9	8 8	8 7	8 6	18 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	19 7
14	8 13	8 12	8 11	8 10	8 9	8 8	8 7	8 6	20 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	21 7
14	8 13	8 12	8 11	8 10	8 9	8 8	8 7	8 6	22 7
	F	F	F	F	F	F	F	F	

PLACAS IKN

9 8 7 6 5 4 3 2 1

Figura 41 – Mapa de grelhas
Fonte: Autoria própria.

O Quadro 3 demonstra a política de manutenção adotada neste segundo período, tanto para o resfriador quanto para os equipamentos periféricos. As inspeções visuais (semanais) são executadas com o equipamento em funcionamento. Já as manutenções preventivas (semestrais) são executadas com equipamento parado durante as paradas programadas do forno. As principais mudanças ocorreram na política de troca das grelhas do resfriador e na manutenção dos ventiladores (só passam por manutenção se ficar evidente algum problema detectado pela análise de vibração).

Equipamento	Tipo de Manutenção	Descrição do Serviço	Periodicidade	Executante
W2K01 (resfriador)	1. Inspeção Visual	1.1 Inspeção nos acionamentos das grelhas, bielas e vedações 1.2 Inspeção nas válvulas de finos 1.3 Lubrificação das rodas de apoio e bielas	Semanal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Inspeção nas placas do IKN e medição de espessura 2.2 Levantamento das grelhas a serem trocadas 2.3 Inspeção na cortina de corrente 2.4 Inspeção nas vigas transversais	Semestral	Inspetor Técnico
	3. Preventiva	3.1 Troca de grelhas (troca das 64 peças da grelha 1, independente da condição) 3.2 Revisão dos acoplamentos, rodas de apoio e bielas 3.3 Revisão das válvulas de finos	Semestral	Mecânico
W2K10 a W2K16 (ventiladores)	1. Inspeção Visual	1.1 Medir vibração com caneta de vibração 1.2 Medir temperatura dos mancais 1.3 Inspeção na fixação do acionamento e mancais	Mensal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Manutenção somente se sugerida pela análise de vibração	Semestral	Mecânico
	3. Preditiva	3.1 Medição de vibração e temperatura	Bimestral	Inspetor Técnico
W2K08 (cadeia arrastadora)	1. Inspeção Visual	1.1 Inspeção no acionamento quanto a fixação, ruído e temperatura 1.2 Lubrificação dos mancais	Semanal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Inspeção nos rodados de acionamento e retorno 2.2 Inspeção na corrente de arraste 2.3 Inspeção nas chapas e placas de sacrifício	Semestral	Inspetor Técnico
	3. Preventiva	2.1 Abertura de mancais e inspeção nos rolamentos 2.3 Inspeção no acionamento e conferência do alinhamento	Semestral	Mecânico
	3. Preditiva	3.1 Medição de vibração e temperatura	Bimestral	Inspetor Técnico
W2M01 (britador)	1. Inspeção Visual	1.1 Inspeção no acionamento quanto a fixação, ruído e temperatura 1.2 Lubrificação dos mancais	Semanal	Mecânico
	2. Preventiva	2.1 Inspeção no rotor e martelos 2.2 Inspeção na placa de sacrifício 2.3 Inspeção nas chapas de revestimento da carcaça	Semestral	Inspetor Técnico
	3. Preventiva	3.1 Abertura de mancais e inspeção nos rolamentos 3.2 Inspeção nas polias e correias de acionamento 3.3 Recuperação / troca das chapas de revestimento	Semestral	Mecânico
	4. Preditiva	4.1 Medição de vibração e temperatura	Bimestral	Inspetor Técnico

Quadro 3 – Plano de manutenção para o resfriador e equipamentos periféricos (2005 a 2011)
Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 2 mostra o número de grelhas trocadas anualmente, referente ao período de 2005 a 2011, perfazendo um total geral de 1.366 peças. Comparando-se os dois períodos percebe-se a redução de troca de grelhas na ordem de 37,45%. A estimativa para 2012 é a troca de 130 peças.

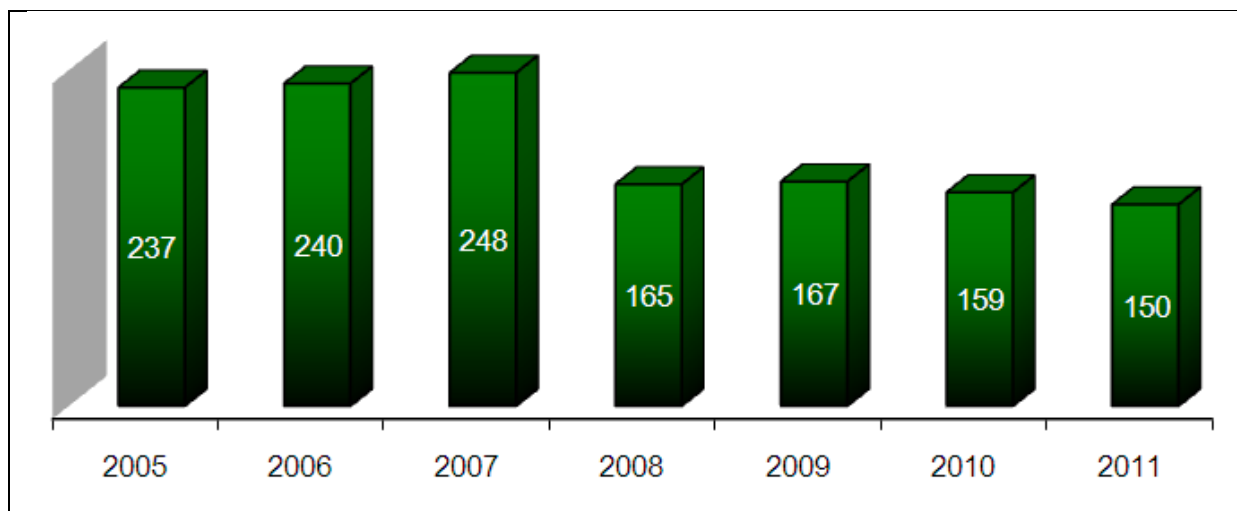


Gráfico 2 – Trocas anuais de grelhas do resfriador (2005 a 2011)

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 mostra que no segundo período o forno parou 28 vezes, durante 391,73 horas. Das 28 paradas, 9 foram provenientes do resfriador, ou seja, 32,14%. Ou ainda, das 391,73 horas paradas, 60,77 foram provenientes do resfriador, ou seja, 15,51%. Levando-se em consideração que 1 hora de forno parado gera um prejuízo de R\$ 56.000,00, pode-se dizer que neste segundo período as horas paradas do forno por problemas no resfriador geraram um prejuízo na ordem de R\$ 3.403.120,00. Comparando-se os dois períodos percebe-se uma economia na ordem de 84,37%.

Tabela 2 – Estratificação de Paradas do Forno e Resfriador (2005 a 2011)

Ano	Paradas Totais do Forno		Paradas Totais do Resfriador	
	Nº de Paradas	Horas Paradas	Nº de Paradas	Horas Paradas
2005	6	14,12	2	3,13
2006	2	22,54	1	13,36
2007	3	27,35	2	21,23
2008	2	151,96	1	4,50
2009	3	18,91	1	6,23
2010	5	79,98	2	7,70
2011	7	76,87	0	4,62
total	28	391,73	9	60,77

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Este quinto capítulo apresenta as conclusões da monografia, bem como as proposições para trabalhos futuros.

O objetivo geral desta pesquisa, que é o estudo de confiabilidade de um resfriador de grelhas utilizado em indústrias de cimento, foi atingido. Mostrou que as ações de manutenções realizadas trouxeram um resultado muito significativo para a empresa.

Quanto aos objetivos específicos, conclui-se que:

- a) As manutenções desnecessárias já não ocorrem mais, como a abertura de mancais para inspeção de rolamentos de ventiladores. Agora, somente quando sugerida pela análise de vibração. Outro exemplo é a padronização da montagem das grelhas, seguindo as instruções indicadas pelo fabricante do equipamento;
- b) A estratégia da troca de todas as grelhas da câmara 1, independente do seu estado, eliminou a troca prematura de grelhas e, conseqüentemente, paradas indesejadas do forno, além de aumentar o tempo de vida útil (permanência) das grelhas no resfriador;
- c) A alteração do projeto da grelha na composição química, no detalhe geométrico, no acabamento (usinagem do assento e das laterais) e na aplicação de revestimento, também eliminou a troca prematura de grelhas e, conseqüentemente, paradas indesejadas do forno, além de aumentar o tempo de vida útil (permanência) das grelhas no resfriador. Houve uma redução na troca de grelhas na ordem de 37,45%;
- d) Ao levantar o histórico de falhas tanto do forno quanto do resfriador, percebe-se que as ações adotadas contribuíram para a redução do número de horas paradas do forno em 84,37%. Em valor monetário a economia chega a R\$ 18.365.760,00.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- a) Levantar os tempos de paradas e os tempos de reparo para cada modo de falha identificado;
- b) Com base nos dados anteriores, calcular a confiabilidade do Subsistema Resfriamento por meio dos programas *BlockSim*² e *Weibull*³.

² Programa da *ReliaSoft* que fornece uma plataforma para análise da confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade de sistemas, utilizando a abordagem de diagrama de blocos de confiabilidade e análise de árvore de falhas. Também simula sistemas reparáveis.

³ Programa da *ReliaSoft* que realiza a análise de dados de vida (análise de confiabilidade), incluindo mais de 13 distribuições estatísticas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

AZEVEDO, C. A. **Otimização da manutenção pela confiabilidade na indústria européia**. In: II Seminário Brasileiro de Confiabilidade na Manutenção, 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: Instituto de Engenharia, 1998. p.44-51.

EUTECTIC: **Catálogo eutronic arc spray 4**. Disponível em: http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo_eutronic_arc_spray_4.pdf acessado em 12/09/2012.

INDICADOR CONSULTORES ASSOCIADOS: **Construção Civil: Cenários e Perspectivas**. Disponível em: <http://www.indicadores.srv.br/centro/files/30.pdf> acessado em 19/01/2012.

ITAMBÉ. **Departamento de produção**. Balsa Nova: 2000. Apostila para treinamento de operadores de fornos.

KARDEC, Alan; LAFRAIA, João Ricardo. **Gestão estratégica e confiabilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2002.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2001.

MONCHY, F. **A função manutenção**. São Paulo: EBRAS/DURBAN, 1989.

MOUBRAY, J. **RCM II: Manutenção centrada em confiabilidade**. Grã Bretanha: Biddles Ltd., Guilford and King's Lynn, 2000. Edição Brasileira.

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio A. Nascif. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2001.

POLYSIUS. **Apostila de operação de fornos Polysius**. São Paulo: 2000. Apostila para treinamento de operadores de fornos.

SILVA, E. L., MENEZES, E. M., **Metodologia da pesquisa e elaboração de**

dissertação. 4. ed. Florianópolis: LED / PPGEF / UFSC, 2005.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO: **PressKit 2011**. Disponível em: http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2011.pdf acessado em 22/01/2012.

SOUZA, G. F. M.; MOLINARI, R. **Fundamentos da manutenção de sistemas mecânicos**. São Paulo: Epusp, 2008. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecatrônica, PMR-5235. Fundamentos da manutenção de sistemas mecânicos.

SOUZA, G. F. M. **Análise de confiabilidade aplicada ao projeto de sistemas mecânicos**. São Paulo: Epusp, 2008. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecatrônica, PMR-5201. Análise de confiabilidade aplicada ao projeto de sistemas mecânicos.

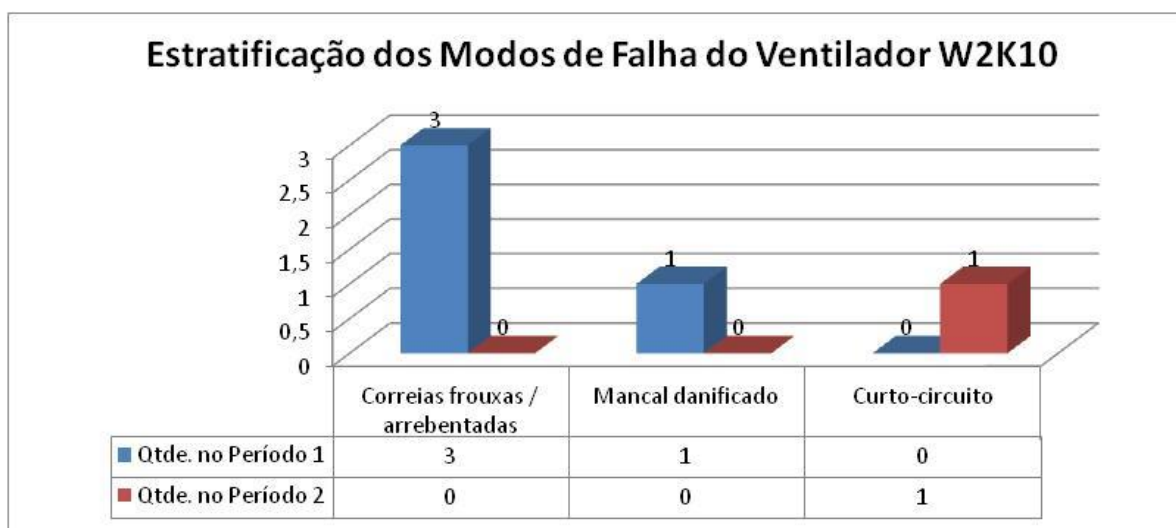
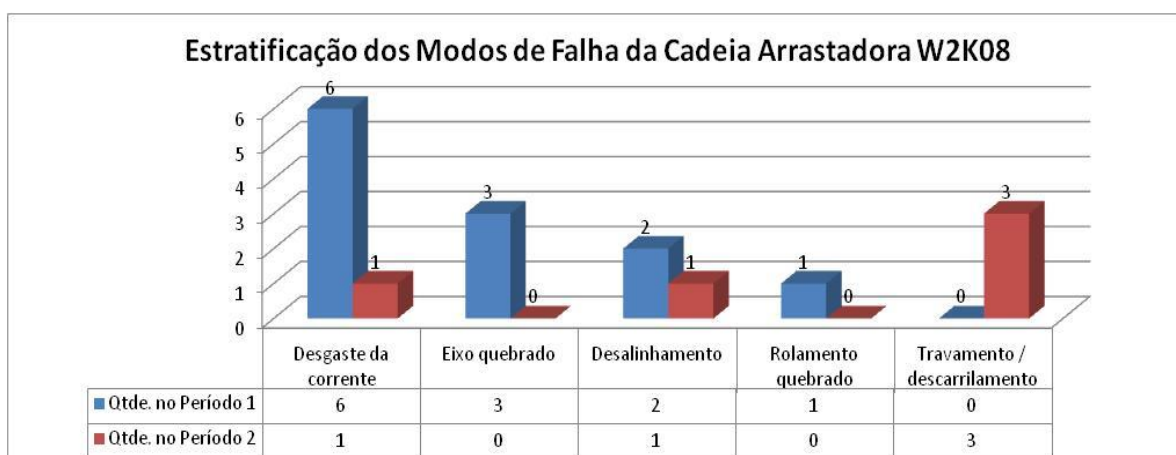
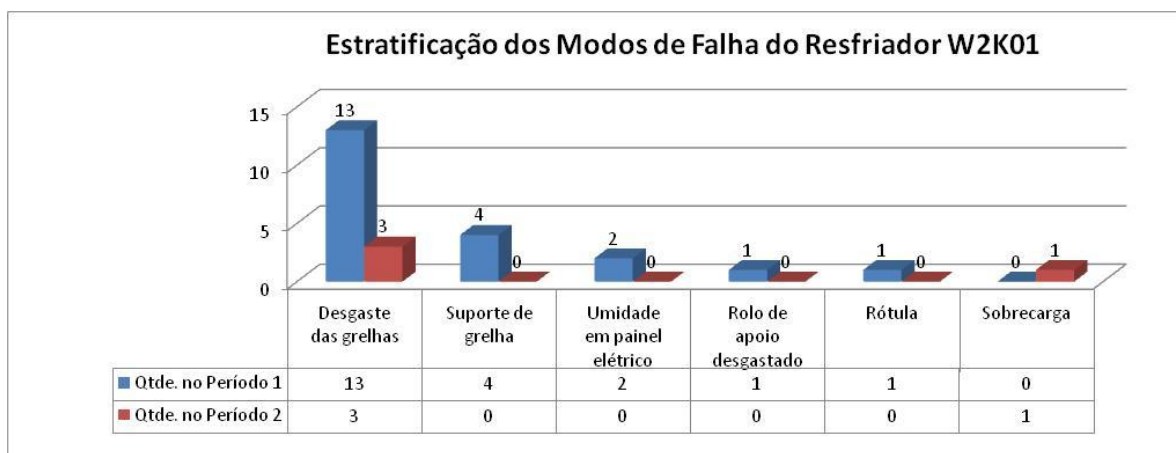
US MIL-STD-1629A. **Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis**. Washington, 1977. Disponível em: <http://www.goes-r.gov/procurement/antenna_docs/reference/MIL-STD-1629A.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2012.

VOTORANTIM. **Votorantim cimentos: programa trainee**. Rio Branco do Sul: 2000. Apostila para treinamento de operadores de fornos.

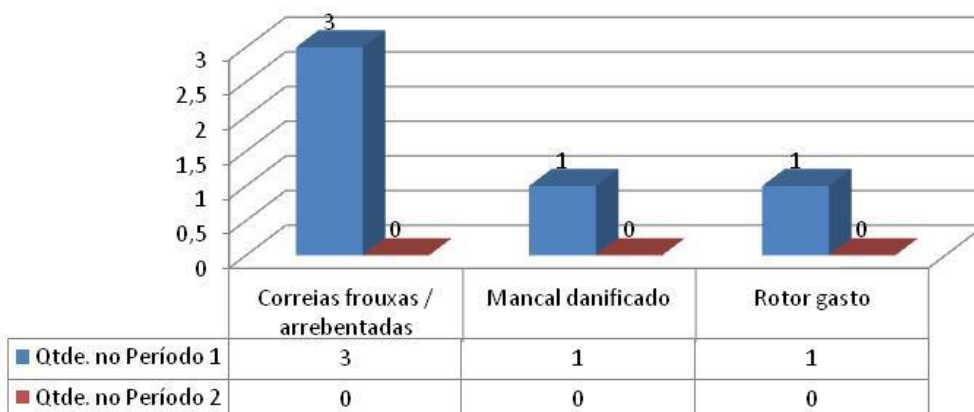
APÊNDICE A – ESTRATIFICAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

Período 1, compreende o intervalo estudado de 1998 a 2004 (antes das melhorias).

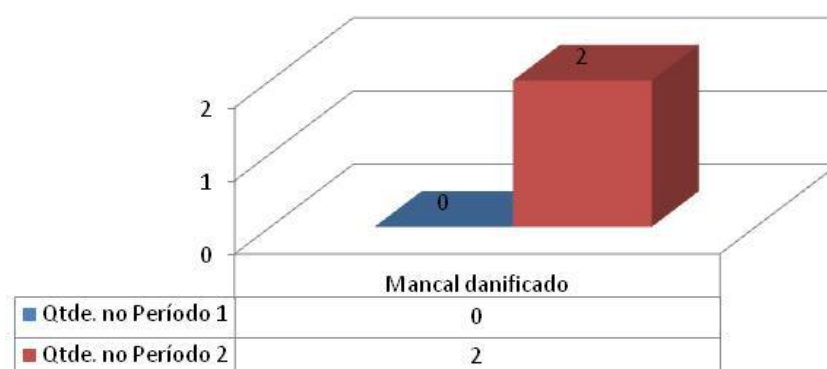
Período 2, compreende o intervalo estudado de 2005 a 2011 (após as melhorias).



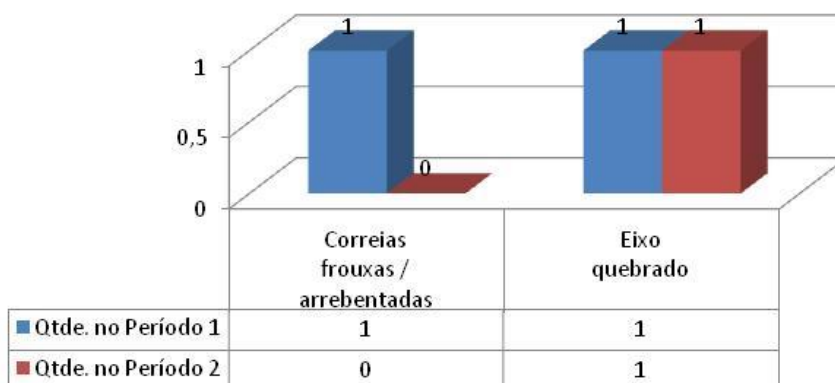
Estratificação dos Modos de Falha do Ventilador W2K11



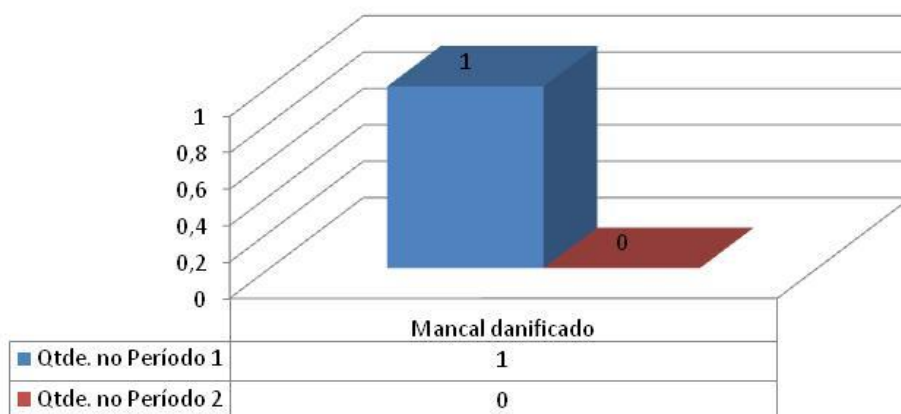
Estratificação dos Modos de Falha do Ventilador W2K12



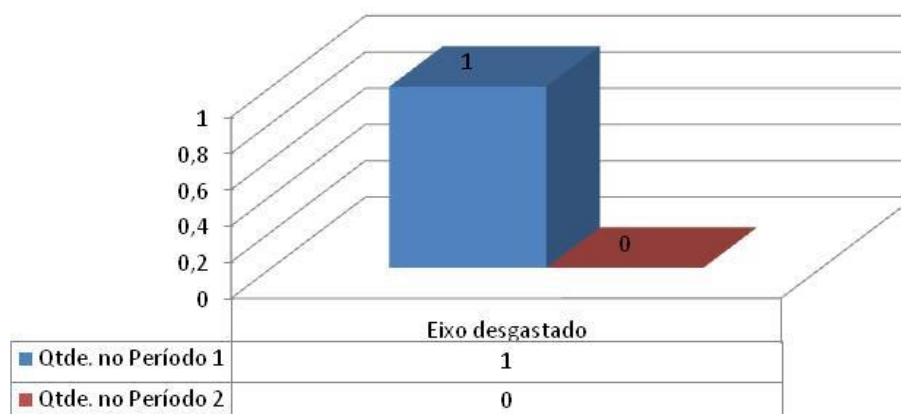
Estratificação dos Modos de Falha do Ventilador W2K13



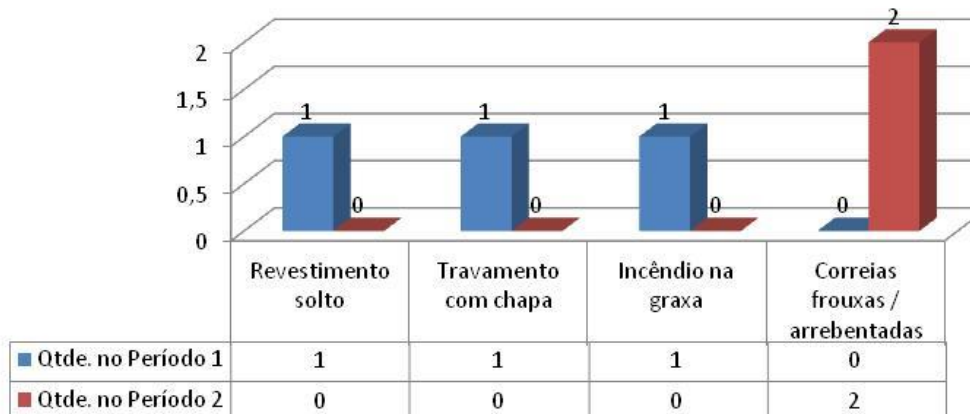
Estratificação dos Modos de Falha do Ventilador W2K14



Estratificação dos Modos de Falha do Ventilador W2K15



Estratificação dos Modos de Falha do Britador W2M01



APÊNDICE B – FORMULÁRIO - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA, SEUS EFEITOS E SUA CRITICIDADE (FMECA)

Formulário - Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA)

Responsável pela Análise: Claudio Cesar Pereira	Equipe: PCM	Data: 15/08/11
Auditado por:		Página / De: 1/1
Sistema: Resfriamento de Clinker		Id Sistema: W2
Subsistema Analisado: Resfriador de Grelhas		Id Subsistema: W2K01

Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Efeito			Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência(O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S. O.D.)
			Local	Sistema	Planta						
Resfriar e transportar o clinker	Não resfriar o clinker	Grelha furada ou desgastada	Vazamento de material	Parada do sistema	Parada da planta	8	Material inadequado	4	Indicação da temperatura da região de maior criticidade e inspeção semestral	2	64
		Ventilação insuficiente ou inadequada	Aumento da temperatura interna	Parada do sistema	Redução da produção	8	Quebra do ventilador	3	Indicação de rotação por vigia de velocidade e análise de vibração mensal	2	48
	Não transportar o clinker	Acionamento parado	Sobrecarga de material	Redução da produção	Redução da produção	7	Sobrecarga	3	Indicação da corrente do motor de acionamento	1	21
		Rolo de apoio travado	Sobrecarga de material	Redução da produção	Redução da produção	6	Desgaste	2	Inspeção semestral	2	24
		Rótula travada	Sobrecarga de material	Redução da produção	Redução da produção	6	Desgaste	2	Inspeção semestral	2	24
		Suporte de grelha quebrado	Sobrecarga de material	Redução da produção	Redução da produção	7	Desgaste	4	Inspeção semestral	2	56

Formulário - Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA)

Responsável pela Análise: Claudio Cesar Pereira	Equipe: PCM	Data: 15/08/11
Auditado por:		Página / De: 1/1
Sistema: Resfriamento de Clinker		Id Sistema: W2
Subsistema Analisado: Cadeia Arrastadora		Id Subsistema: W2K08

Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Efeito			Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência(O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S. O.D.)
			Local	Sistema	Planta						
Transportar o clinker de menor granulometria	Não transportar o clinker	Corrente quebrada	Sobrecarga de material	Parada do sistema	Parada da planta	8	Desgaste	3	Inspeção semestral	2	48
		Eixo de acionamento quebrado	Sobrecarga de material	Parada do sistema	Parada da planta	8	Desgaste	3	Indicação de rotação por vigia de velocidade e análise de vibração mensal	2	48
		Rolamento quebrado	Sobrecarga de material	Redução da produção	Redução da produção	7	Desgaste	2	Indicação da corrente do motor de acionamento	1	14
			Sobrecarga de material	Redução da produção	Redução da produção	7	Falta de lubrificação	1	Lubrificação semanal	2	14
		Travamento / descarrilamento	Sobrecarga de material	Redução da produção	Redução da produção	8	Desalinhamento	2	Inspeção semestral	1	16

Formulário - Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA)

Responsável pela Análise: Claudio Cesar Pereira	Equipe: PCM	Data: 15/08/11
Auditado por:		Página / De: 1/1
Sistema: Resfriamento de Clinquer		Id Sistema: W2
Subsistema Analisado: Ventiladores		Id Subsistema: W2K10 a W2K16

Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Efeito			Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência(O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S. O.D.)
			Local	Sistema	Planta						
<u>Insuflar ar no interior do Resfriador</u>	Não insuflar ar no interior do Resfriador	Correias frouxas / arrebitadas	Parada do Equipamento	Parada do sistema	Redução da produção	6	Desgaste	3	Análise de vibração mensal	1	18
		Mancal danificado	Parada do Equipamento	Parada do sistema	Redução da produção	6	Folga	3	Análise de vibração mensal	1	18
			Parada do Equipamento	Parada do sistema	Redução da produção	6	Falta de lubrificação	2	Lubrificação semanal	2	24
		Rolamento quebrado	Parada do Equipamento	Parada do sistema	Redução da produção	6	Desgaste	2	Análise de vibração mensal	1	12
			Parada do Equipamento	Parada do sistema	Redução da produção	6	Falta de lubrificação	1	Inspeção semestral	1	6
		Rotor danificado	Parada do Equipamento	Parada do sistema	Redução da produção	6	Desgaste	2	Análise de vibração mensal	1	12
Eixo quebrado	Parada do Equipamento	Parada do sistema	Redução da produção	6	Desgaste	2	Análise de vibração mensal	1	12		

Formulário - Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA)

Responsável pela Análise: Claudio Cesar Pereira	Equipe: PCM	Data: 15/08/11
Auditado por:		Página / De: 1/1
Sistema: Resfriamento de Clinquer		Id Sistema: W2
Subsistema Analisado: Britador de Martelos		Id Subsistema: W2M01

Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Efeito			Severidade (S)	Causas do Modo de Falha	Ocorrência(O)	Controles Atuais	Detecção (D)	NPR (S. O.D.)
			Local	Sistema	Planta						
<u>Britar o clinquer que sai do Resfriador</u>	Não britar o clinquer	Martelos quebrados	Sobrecarga de material	Parada do sistema	Parada da planta	8	Desgaste	2	Inspeção semestral	1	16
		Revestimento solto	Vibração elevada	Parada do sistema	Parada da planta	7	Desgaste	1	Inspeção semestral	2	14
		Travamento com chapa	Sobrecarga de material	Parada do sistema	Parada da planta	7	Desgaste	1	Inspeção semestral	2	14
		Correias frouxas / arrebitadas	Sobrecarga de material	Parada do sistema	Parada da planta	8	Desgaste	2	Indicação de rotação por vigia de velocidade e análise de vibração mensal	1	16

ANEXO A – RESFRIAMENTO DE CLÍNQUER

Parte integrante da apostila de treinamento de novos funcionários da empresa Votorantim Cimentos, denominada: VOTORANTIM CIMENTOS – PROGRAMA *TRAINEE*, 2000.

1 DEFINIÇÃO

Etapa da fabricação de cimento onde se processa o resfriamento do clínquer. Este resfriamento influi na estrutura, composição mineralógica, bem como na moabilidade e conseqüentemente na qualidade do cimento.

O resfriamento é necessário por que :

- Clínquer quente é difícil de transportar;
- Clínquer quente tem um efeito negativo no processo de moagem;
- Recupera-se parte do calor que sai com o clínquer;
- Garante a qualidade do cimento.

A evidente possibilidade de recircular o calor do clínquer ao forno, estabeleceu a conveniência de utilizar para o resfriamento, fluxo direto de ar em contracorrente ou transversal. Este ar depois serviria em parte ou em sua totalidade, como ar secundário para a combustão.

A velocidade de resfriamento do clínquer influi na razão entre o conteúdo cristalino e a fase líquida no cristal. Durante resfriamento lento, praticamente todos os cristais são formados, enquanto que, para resfriamento rápido, formam-se cadeias de cristais e a fase líquida se torna vítrea. Além disso, o resfriamento rápido evita a formação de grandes cristais. Rápido resfriamento influi especialmente no comportamento do óxido de magnésio, e, portanto na resistência do cimento.

Um dos fatores que influi na resistência do cimento é o tamanho dos cristais de periclásio. A hidratação deste cristal vem acompanhada de incremento no volume, causando impacto, a longo prazo, na qualidade do cimento.

2 TIPOS DE RESFRIADORES

Os principais tipos de resfriadores são: resfriadores planetários (satélites), tipo *Unax*, resfriadores rotativos e de grelhas. Atualmente os mais utilizados são os resfriadores de grelhas.

As diferenças principais entre os diferentes tipos de resfriadores são:

- Método de transferência de calor;
- Comprimento e *design* da zona de pré-resfriamento;
- Nível da temperatura de entrada do clínquer;
- Forma de controle.

O início da zona de pré-resfriamento é marcado pela linha de ponto de colisão entre o clínquer e a parede do resfriador. As diferenças acima mencionadas apresentam reflexo direto sobre o consumo térmico da planta.

2.1 Resfriador Rotativo

O resfriador rotativo (Figura 42) é o mais velho tipo de resfriador de clínquer, construído para trabalhar em conjunto com o forno rotativo. O resfriador rotativo consiste de um cilindro de revolução seguindo o forno rotativo, ou por razões de espaço, posicionado logo abaixo em direção oposta. Resfriadores rotativos são montados sobre dois anéis de movimentação, sendo que o acionamento é independente do acionamento do forno. Tais equipamentos operam numa faixa de 0 a 8 rpm.

A pressão negativa no forno induz uma sucção de ar frio pela abertura da saída do resfriador. Este ar de resfriamento passa pelo resfriador rotativo em contracorrente com o clínquer. Quando entra no forno, o ar de resfriamento já está a uma temperatura entre 400 e 750°C. O clínquer entra no resfriador rotativo a uma temperatura aproximada de 1300 – 1350°C, saindo a 150 – 300°C. A eficiência deste tipo de resfriador varia de 55 – 75% para processo via seca e alcança valores de até 78% para processo via úmida.

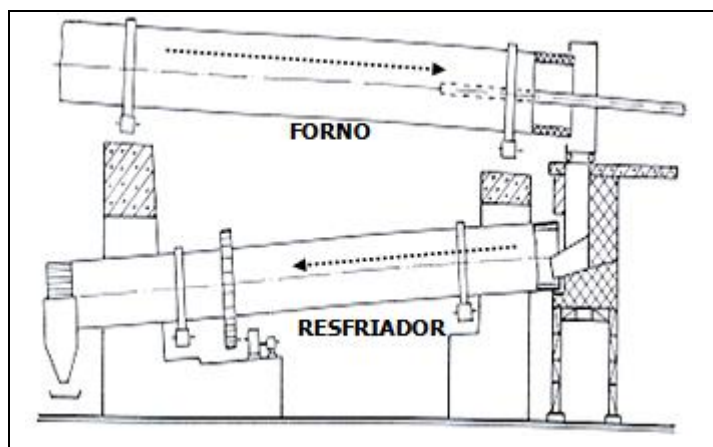


Figura 42 – Resfriador rotativo
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

2.2 Resfriador Planetário

Também conhecido como resfriador de satélites. Foi introduzido em 1910 na indústria cimenteira com o nome de “resfriador Concentra”. Em 1922, F. L. Smith passou a denominá-lo de resfriador tipo *Unax*.

Tal resfriador tem servido por muitos anos a indústria de cimento e fora originalmente construído para processo via úmida com uma grande quantidade de ar secundário disponível para o resfriador. Em processos via seca a quantidade de ar secundário disponível para resfriamento é menor. Isto requer uma alta eficiência de troca térmica entre o ar e o clínquer. Isto também requer que as paredes sejam revestidas com material cerâmico para suportar altas temperaturas (Figura 43).

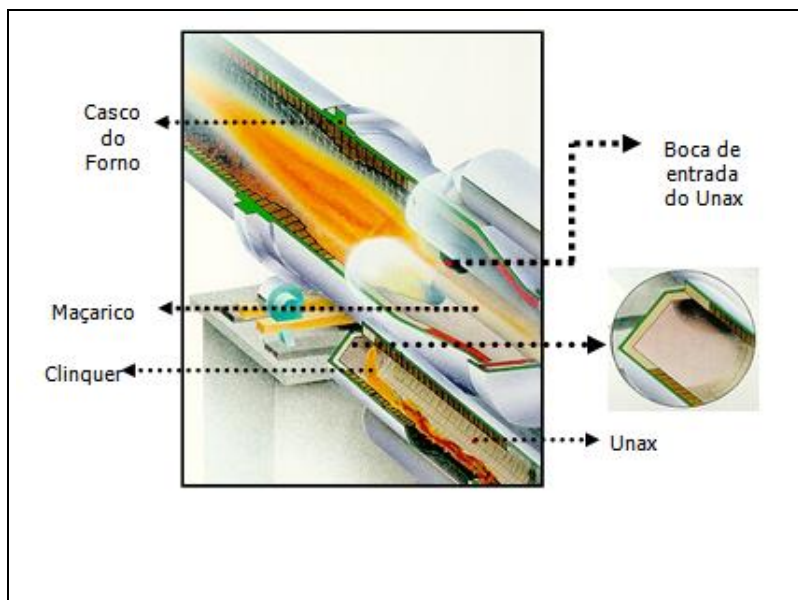


Figura 43 – Vista interna do forno e do resfriador unax
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

O resfriador de satélites consiste de cerca de 10 a 11 tubos metálicos arranjados “como uma coroa” ao longo da circunferência na extremidade final do forno, tornando-se parte integral do forno rotativo. Este tipo de resfriador gira juntamente com o forno, sem acionamento independente. Interiormente, as paredes são revestidas com tijolo refratário para proteção do casco dos tubos e garantir uma melhor troca térmica entre o clínquer e o ar. Além disso, os tubos são dotados de elementos levantadores para facilitar esta troca térmica. Aberturas no casco do forno permitem a entrada do clínquer no resfriador. O resfriamento ocorre em contracorrente. O ar total de resfriamento entra no forno como ar de combustão. O movimento do clínquer no resfriador de satélites é, na maior parte das vezes, paralelo ao movimento do clínquer no forno rotativo. Contudo, também existem resfriadores de satélites capazes de conduzir o clínquer em direção oposta devido à sua construção interna. Tais resfriadores estão limitados a uma produção de 4000 t/d.

Em 1965, F.L.Smith lançou resfriadores de satélite com um novo design. A característica substancial deste novo design é a extensão do tubo do forno e a formação de um rolo adicional montado para suportar a extensão do tubo do forno. Baseando-se neste design, foi possível instalar tubos cilíndricos maiores sem impactar na capacidade de sustentação do casco do forno.

A Figura 44 mostra uma instalação completa de clínquerização. Torre de

ciclones para pré-aquecer a matéria-prima, forno rotativo, resfriador de satélites (tubos cilíndricos) e plataforma de acesso ao queimador. O resfriador de satélites é bastante simples. Não trabalha com excesso de ar, não necessita de motor ou ventilador próprio, nem instrumentos. Em operação, não há controle específico. Ele é auto ajustável.

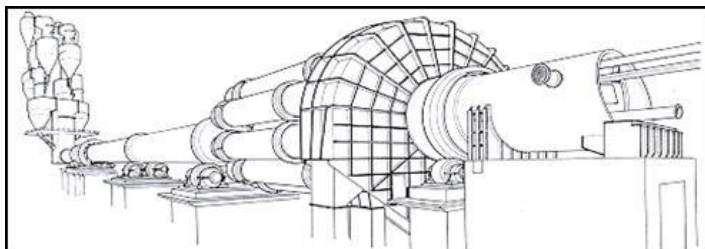


Figura 44 – Resfriador planetário
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

2.3 Resfriador de Grelhas

Os resfriadores de grelhas foram desenvolvidos para serem operados em conjunto com o forno rotativo. Um dos primeiros resfriadores de grelhas foi desenvolvido pela *Fuller Company*, iniciando sua operação em 1937. Tal resfriador foi desenvolvido para eliminar o efeito maléfico de expansão do cimento causado pela recristalização do MgO.

Os resfriadores de grelhas são os tipos de resfriador atualmente mais utilizados (Figura 45). Nestes resfriadores é preciso diferenciar o princípio de transporte. São basicamente dois, a saber:

- Transporte de clínquer através do movimento de ida e volta da grelha;
- Transporte a partir do movimento circular desta mesma grelha.

Os resfriadores de grelha utilizados hoje associam ambos os princípios de transporte. Pequenos resfriadores, os quais são utilizados apenas como recuperadores e trabalham em conjunto com um moinho de rolos e um resfriador gravitacional representam *designs* especiais.

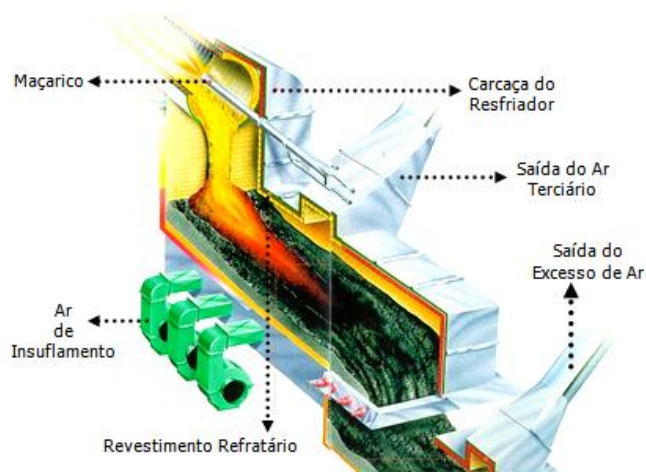


Figura 45 – Vista interna do resfriador de grelhas
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

Tais resfriadores utilizam ar frio ou ar de recirculação. A temperatura de saída do clínquer pode atingir 80 – 100°C. Comparativamente, as perdas no resfriador de grelhas e nos demais tipos apresentados podem ser listadas como segue:

- No resfriador de grelhas, aproximadamente 75% da energia perdida ocorre com o ar de exaustão (ar de excesso da grelha), 25% com o clínquer e 5% como radiação e outras perdas;
- Nos resfriadores rotativos e tipo satélite, 65% da perda de energia ocorre por radiação das paredes dos tubos e 35% pelo incompleto resfriamento do clínquer.

A entalpia do ar de exaustão pode ser utilizada para secagem da matéria-prima.

2.3.1 Princípios de Funcionamento

O resfriador de grelha funciona segundo o princípio de corrente transversal, e, para que se possa ter uma idéia do processo, imagine uma seção transversal do resfriador. Nesta seção, o clínquer estará em repouso e o ar estará passando através dele, de baixo para cima. Trata-se de um princípio de contracorrente em que

uma das partes não se desloca.

A condição ótima para intercâmbio térmico ocorre quando a velocidade de escoamento deste ar for tal que ele saia da camada de clínquer a uma temperatura apenas um pouco menor que a temperatura do clínquer, na parte superior da camada. Caso o escoamento do ar seja mais lento, o perfil de temperatura da camada de clínquer irá mudar lentamente. Nota-se neste caso que a temperatura do clínquer no nível médio da camada apresenta a mesma temperatura que o clínquer da camada superior. Caso o escoamento do ar seja muito rápido, todas as partículas de clínquer da camada inferior passarão a ter a mesma temperatura do ar de resfriamento. Devido a sua alta velocidade, o ar não conseguirá atingir uma temperatura próxima da temperatura do clínquer na camada superior.

Para um clínquer fino, a troca de calor ocorre quase que de forma instantânea. Para um clínquer grosso, também se pode afirmar que a troca de calor entre o ar e a superfície do clínquer ocorre de forma instantânea. Porém, o deslocamento de calor do centro para superfície é mais lento. Desta forma, no lado do resfriador onde preferencialmente estão os grandes pedaços de clínquer, o ar deve ter uma menor velocidade.

Em cada partícula de clínquer ocorre uma transferência de calor até a superfície da partícula, de onde este calor é expelido com o ar. O transporte de calor na partícula ocorre por condução, enquanto que o mecanismo de transporte mais importante, sobre os limites das fases clínquer e ar, é a convecção forçada. O fluxo térmico sobre o limite das fases é função da velocidade do ar e da força atuante, ou seja, da diferença entre a temperatura da superfície do clínquer e a temperatura do ar de resfriamento. O transporte de calor, fora do clínquer, é realizado por convecção forçada.

Quando o ar sobe através da camada de clínquer, ele o afeta com uma força para cima, oposta à força da gravidade. Quanto maior esta velocidade, maior será a força para cima, e no final, a partícula começará a flutuar. Quando todas as partículas de clínquer estiverem flutuando, temos uma fluidização.

Caso a velocidade seja média, apenas as partículas finas flutuarão, enquanto que os grandes pedaços não conseguirão ser elevados. Temos então uma situação em que as partículas menores se concentram na camada superior e as grandes na camada inferior. É uma situação desejável, pois desta forma se consegue uma maior diferença entre a temperatura do ar de resfriamento e o centro dos grandes pedaços

de clínquer, contribuindo para um bom e rápido resfriamento.

Para que se tenha um ótimo intercâmbio térmico o ar deverá ser regulado individualmente para cada zona do resfriador, dependendo da espessura da camada e da distribuição de partículas. Caso o forno produza um clínquer muito pulverulento, haverá concentração de partículas finas em um dos lados da grelha. A troca térmica neste caso não será eficiente e ocorrerá o fenômeno conhecido como “rio vermelho”.

Esta regulagem individual pode ser feita de duas formas:

- Através da regulagem forçada da corrente de ar, o que exigiria um conhecimento do perfil de temperatura, da espessura da camada e da distribuição das partículas segundo o tamanho, em cada local do resfriador;
- Deixando que a corrente de ar se adapte à situação. Isso não se pode conseguir, porém é possível fazer com que a corrente de ar seja menos sensível às variações da espessura da camada e da distribuição de partículas segundo o tamanho.

O primeiro método descrito foi solucionado pela nova geração de resfriadores de grelha, que conta com um fornecimento especial de ar para as grelhas móveis e barras fixas.

No segundo método, a distribuição de ar é resolvida aumentando-se a resistência total das grelhas e da camada de clínquer.

Nos sistemas de grelhas convencionais, o clínquer é resfriado de forma desigual e há diferenças consideráveis entre a temperatura em um lado e outro da grelha. A Figura 46 mostra a separação inevitável do clínquer de um forno, com rotação à direita, em que o clínquer fino fica à esquerda e o grosso à direita.

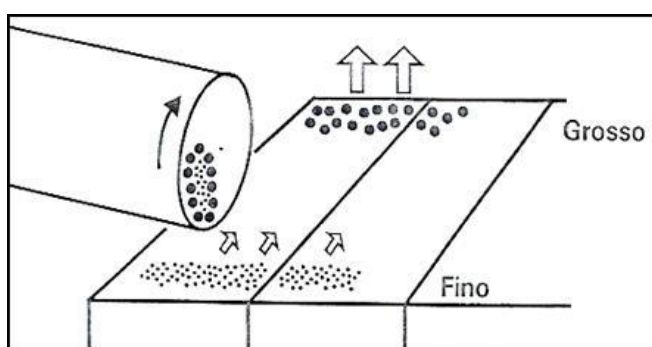


Figura 46 – Distribuição do clínquer na grelha
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

Desta forma, a maior parte do ar de resfriamento passa através da camada de clínquer pelo lado grosso, onde a resistência é mais baixa. Conseqüentemente, passa menos ar de resfriamento pelo lado fino. Este resfriamento desigual se deve aos dois seguintes fatos:

- É natural que o ar de resfriamento siga o percurso mais fácil através do clínquer, ou seja, onde o tamanho das partículas seja grande;
- Os sistemas tradicionais de resfriamento não são projetados de forma a dirigir o ar mais igualmente tanto através do clínquer fino como do grosso.

Como resultado se tem um resfriamento desigual. Para garantir um resfriamento mais eficaz, trabalha-se com uma maior quantidade de ar de resfriamento. Esta elevada quantidade de ar resulta em temperaturas mais baixas para o ar secundário e terciário. Isto acaba acarretando um consumo maior e desnecessário de energia.

2.3.2 Tipos de Resfriadores de Grelha

Existem vários fabricantes e vários tipos de resfriadores de grelha, porém o princípio básico de funcionamento é o mesmo. Os tipos mais utilizados em fábricas de cimento são:

- Fuller;
- Coolax;
- Recupol;
- Repol;
- Pyrostep;
- IKN ;
- Folax;
- Cross Bar;
- Claudius Peters.

- **Fuller:** comparativamente com o resfriador rotativo, este tipo requer aproximadamente 20% menos espaço. A perda de calor deste resfriador por radiação e convecção é extremamente baixa. Aplicação de excesso de ar de resfriamento resulta numa temperatura de saída do clínquer abaixo de 70°C. Esta temperatura permite uma imediata moagem deste clínquer. Originalmente, este resfriador foi construído com uma inclinação de 15°. Em novos desenvolvimentos, esta inclinação diminuiu para 10°, depois para 5°, até que uma grelha horizontal foi desenvolvida. O resfriador consiste de grelhas móveis e estáticas. As grelhas são acionadas por motores de velocidade variável. A última grelha descarrega o material numa grade inclinada, de onde, a maior parte do clínquer, após passar pela grade, vai ao transportador. Um britador de clínquer localizado após a última grelha quebra as partículas maiores (Figura 47).

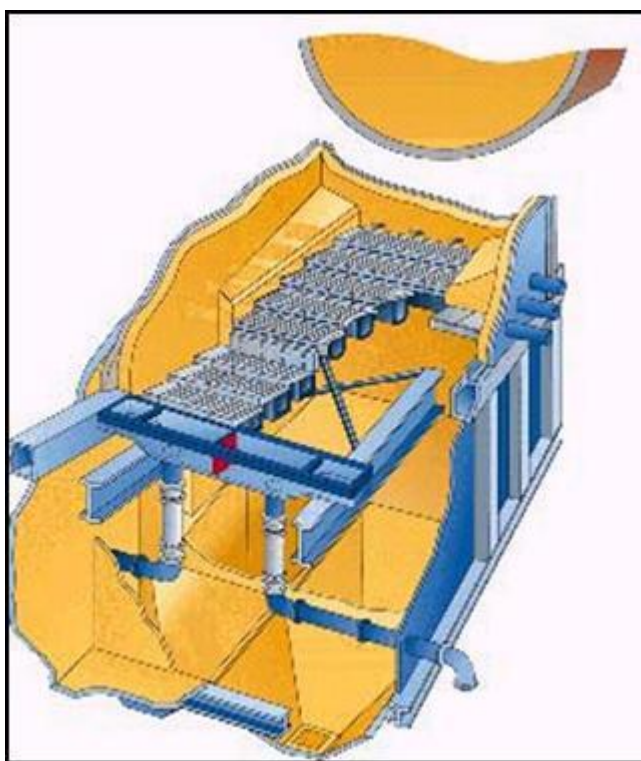


Figura 47 – Resfriador Fuller
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

- **Coolax:** a principal vantagem deste sistema é que os demais resfriadores podem ser modificados para este princípio. Neste resfriador o ar de resfriamento é introduzido diretamente nas chapas da grelha através de um sistema de vigas e condutos ocultos (Figuras 48 e 49). Isso difere dos resfriadores convencionais que recebem o ar

através de uma câmara comum por baixo da grelha. A vantagem de se fornecer ar desta maneira é a de se ter uma distribuição igual do ar de ambos os lados da grelha. Desta forma a quantidade de ar de resfriamento pode ser reduzida sem que haja prejuízo ao resfriamento. Este resfriador apresenta um só modelo de placas e, pelo seu ordenamento, podem dividir-se em duas zonas principais. São as zonas de recuperação, na entrada do resfriador, e zona de pós-resfriamento. A zona de recuperação conta com ar de insuflamento fornecido por 10 ventiladores. A zona de pós-resfriamento é menor que a zona de recuperação e conta com ar de insuflamento proveniente de apenas um ventilador. Outras vantagens deste sistema são:

- Aumento da temperatura do ar secundário: aumenta-se cerca de 200 - 300°C se comparado com os demais resfriadores;
- Não há aeração;
- Menor circulação de pó entre o resfriador e o sistema do forno, redução de cerca de 6% nesta circulação.

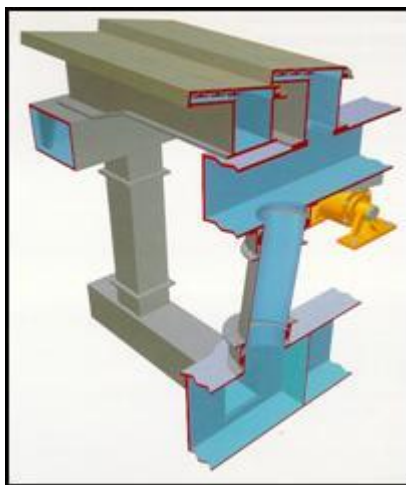


Figura 48 – Detalhe do conduto de ar
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

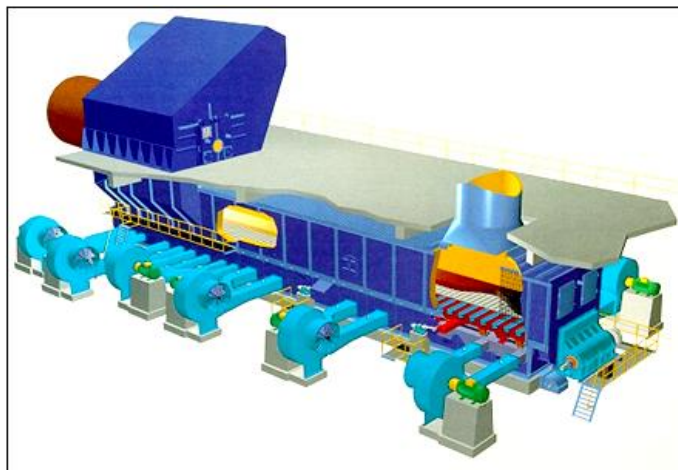


Figura 49 – Resfriador Coolax
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

- **Recupol:** apresenta água de resfriamento introduzida na entrada do resfriador para impedir a formação do “homem de neve”. Esta água é introduzida pelo prato espalhador de material (Figura 50). Para uma melhor distribuição do clínquer, a inclinação deste prato é ajustável em duas direções: horizontalmente e lateralmente ao resfriador. Durante o processo de resfriamento, clínquer fino cai por entre os pratos da grelha, sendo descarregado no transportador. O britador de clínquer acompanha a largura total da grelha. Quebra as partículas maiores, sendo que alguns pedaços retornam para dentro do resfriador. Um pouco antes do britador, existe uma cortina de correntes para proteger o revestimento refratário. O resfriamento do clínquer ocorre em duas zonas. Na zona de pré-resfriamento, ar injetado e pulsadores transformam a camada de clínquer em algo similar a um leito fluidizado. Isto resulta em uma boa distribuição do clínquer ao longo do comprimento da grelha. Na segunda zona de resfriamento, o leito de clínquer baixa, causando um acúmulo de partículas finas na parte superior e de partículas grossas na parte inferior da camada. Esta separação granulométrica é considerada a principal vantagem do segundo resfriamento.

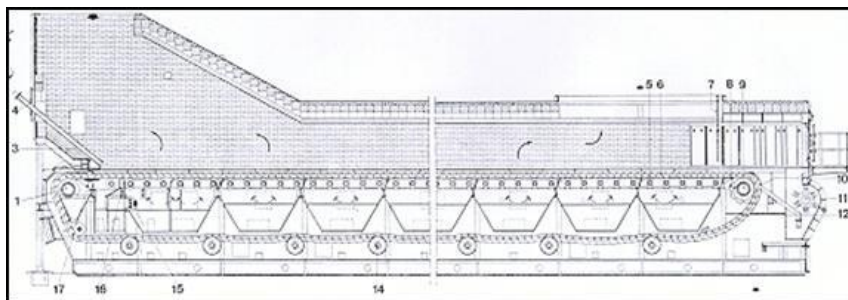


Figura 50 – Resfriador Recupol
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

1. Rolo de transmissão;
 3. Trava de suporte;
 4. Prato de espalhamento (injeção de água de resfriamento) ;
 5. Guia para grelha superior;
 6. Prato de desvio;
 7. Cortina de correntes;
 8. Rolo de retorno;
 9. Transmissão;
 10. Faixa da grelha;
 11. Britador de clínquer;
 14. Guia para retorno da grelha;
 15. Pulsador;
 16. Boca do soprador;
 17. Gancho do prato.
- Repol: a diferença básica deste tipo de resfriador é que este sistema opera com duas camadas de clínquer. A camada inferior está em contato direto com a grelha e é formada por clínquer frio que circula no sistema. A camada superior é formada por clínquer quente proveniente do forno. Ambas as camadas se movem paralelamente até a descarga de material, onde são separadas. A camada inferior cai por uma abertura, vai a uma rosca transportadora, um elevador e volta ao resfriador. A camada superior vai a um britador de rolos. Uma das principais vantagens deste sistema é a proteção, contra esforços térmicos, das placas da grelha. A grelha está constituída por duas zonas bem estabelecidas. A primeira, na entrada do resfriador, é formada por 8 filas de placas cegas, sobre as quais se encontra o reservatório de clínquer frio. A segunda zona é composta por 35 filas entre placas móveis e fixas.

- Pyrostep: apresenta várias zonas com desenho, sistemas de controle e formas de refrigeração diferentes. Trabalha com duas camadas de clínquer a exemplo do Repol. Existem cinco zonas de resfriamento definidas, dependendo da capacidade instalada e do grau de resfriamento desejado. A primeira zona é formada por vários níveis de placas estacionárias que tem como finalidade homogeneizar e distribuir o clínquer sobre toda a superfície da grelha. As placas nesta zona são cegas, permitindo que o ar flua apenas por uma abertura horizontal entre as filas de placas que são escalonadas. A segunda zona apresenta placas tipo “Omega”. Tais placas apresentam cavidades dentro das quais o clínquer se aloja, permitindo uma melhor troca térmica. A zona três é formada por placas estacionárias similares às da zona 1. A zona 4 é formada por placas tipo “Omega” e seu tamanho depende da capacidade instalada. Na zona 5 o clínquer sofre o último resfriamento, sendo então encaminhado ao britador.
- IKN: este resfriador possui grelhas fixas na entrada, com aeração individual (Figura 51). Isto permite uma alta pressão de aeração e um forte jato horizontal. Este jato horizontal realiza o conceito de fluidização parcial. Assim, todos os finos passam rapidamente através dos interstícios da camada de clínquer e são moderadamente fluidizados até o topo da camada. Desta forma, ficam sobre as partículas grossas de clínquer. Tais partículas são resfriadas até o máximo do diferencial de temperatura, visto que, a fluidização de finos eleva a temperatura do ar secundário. A recuperação de calor neste caso pode ser superior a 78%. O resfriador IKN possui um sistema chamado de *Heat Shield*. Este *Heat Shield* funciona como moderador de fluxo. Quando partículas grandes de clínquer encostam-se ao *Heat Shield*, empurrando-o, o sistema levanta automaticamente e deixa a partícula de clínquer passar (Figura 52). Isto possibilita uma melhor troca térmica entre o clínquer e o ar de insuflamento. O sistema de distribuição de clínquer na entrada do resfriador é muito eficiente. Além disso, pode ser adaptado a outros resfriadores. A este sistema de distribuição de clínquer na entrada do resfriador, a IKN chama de KIDS. A instalação deste KIDS traz como benefícios, maior temperatura do ar terciário, baixa quantidade de ar de resfriamento, clínquer resfriado de forma ótima, longo tempo de vida útil para os pratos da grelha, baixa recirculação de ar, entre outros.

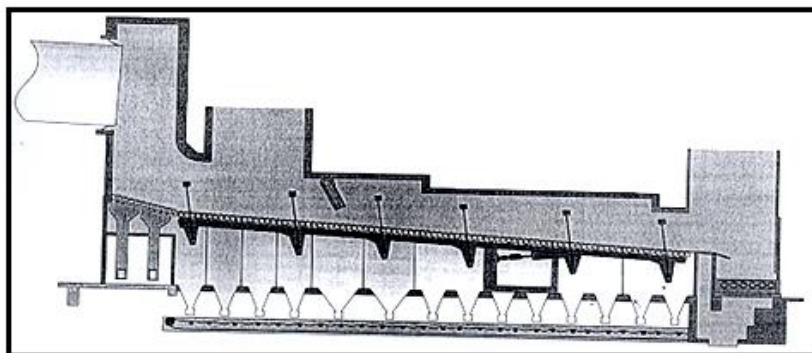


Figura 51 – Resfriador IKN
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

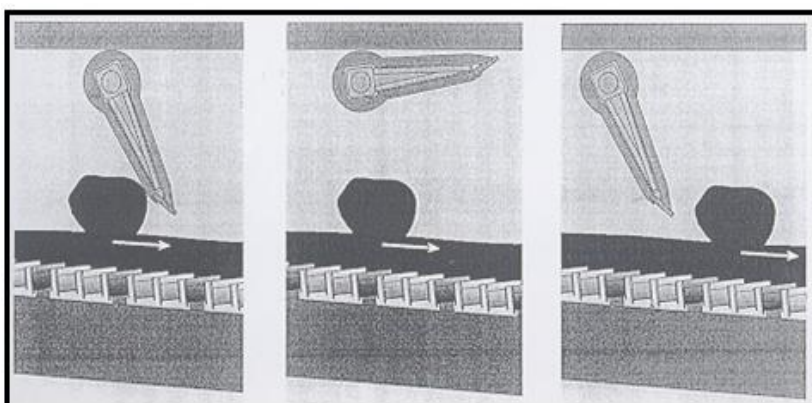


Figura 52 – Funcionamento do *heat shield*
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

- **Folax:** a entrada do resfriador é equipada com uma grelha de resfriamento rápido com ar de insuflamento próprio para promover o resfriamento inicial do clínquer. A grelha de resfriamento rápido é seguida por uma ou mais seções de grelhas horizontais. Em alguns casos, a primeira seção pode ser inclinada. Abaixo da grelha, o resfriador é dividido em compartimentos providos de sopradores para injeção de ar de resfriamento. Este arranjo garante ótima distribuição de ar. Este resfriador é equipado com revestimento refratário monolítico. Após o resfriador, o clínquer fino passa sobre uma grade na saída e o clínquer grosso é britado em um britador de martelos (Figura 53). Uma cortina de correntes protege o revestimento do resfriador de partículas que porventura ricocheteiem. Resfriadores com precipitadores eletrostáticos são providos de injeção de água no espaço acima do leito de clínquer.

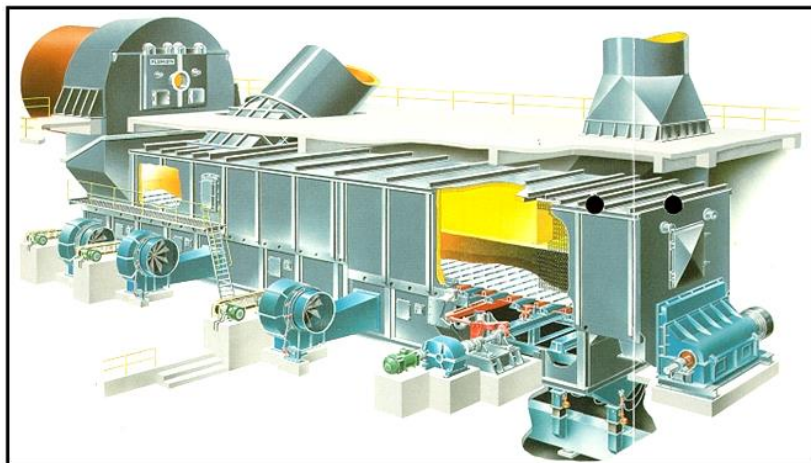


Figura 53 – Resfriador Folax
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

- SF Cross Bar: é o resfriador mais novo em termos de desenvolvimento tecnológico. Apresenta pratos de distribuição com regulagem mecânica, longa vida útil, fácil instalação, operação e manutenção e menor consumo de energia. O menor consumo de energia se deve principalmente ao fato deste resfriador trabalhar com uma perda de pressão menor que os demais. Isto é possível devido a sistema de regulagem do fluxo de ar (Figura 54). Esta regulagem por compartimentos permite que mesmo com uma distribuição não uniforme das partículas de clínquer ao longo do resfriador, consiga-se uma boa distribuição do ar e também um resfriamento uniforme (Figuras 55 e 56). Dentro destes novos conceitos, este resfriador apresenta uma baixa perda de calor e uma alta eficiência de troca térmica. Conseqüentemente há uma redução no consumo de energia.



Figura 54 – Regulagem mecânica do fluxo de ar
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

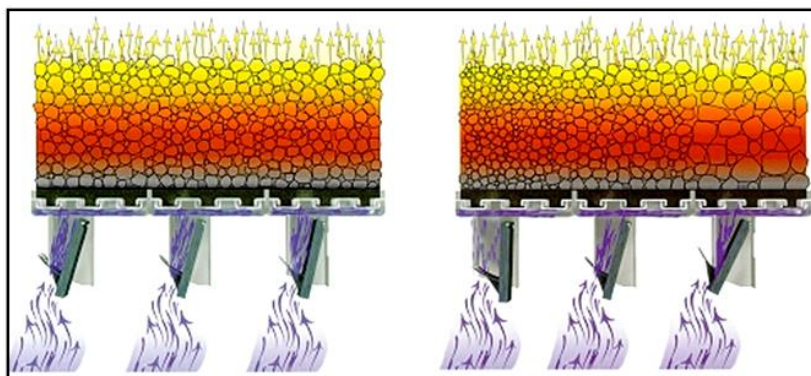


Figura 55 – Distribuição de ar
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

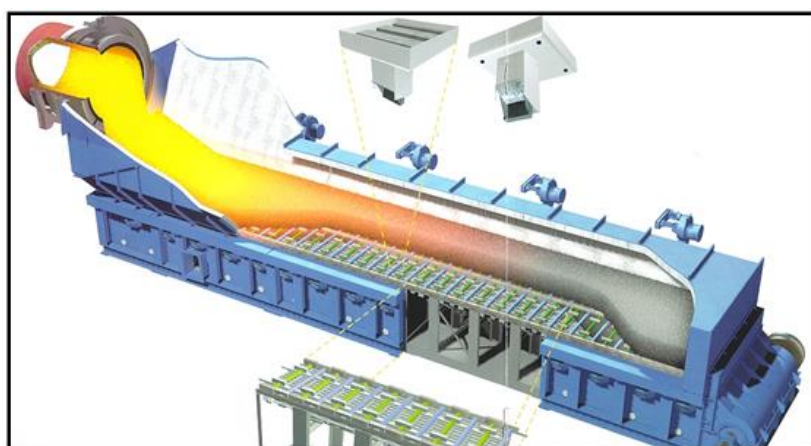


Figura 56 – Resfriador *Cross Bar*
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

- Claudius Peters: tais resfriadores são desenhados para utilizar o menor volume possível de ar de resfriamento, com uma alta eficiência. Este resfriador possui um britador intermediário, entre a zona de recuperação de calor e a zona de resfriamento propriamente dita. Este britador quebra as partículas maiores de clínquer. Desta forma, na zona de resfriamento, o clínquer já é alimentado cominuído, facilitando o resfriamento, pois a troca térmica é mais efetiva. Trata-se de um resfriador compacto, que requer pouco espaço e possibilita grande estabilidade nas temperaturas de ar secundário e terciário. Além disso, possibilita um bom controle da temperatura de saída do clínquer. Para completa flexibilidade do sistema, cada uma das grelhas (zona de recuperação e resfriamento), possui acionamentos independentes (Figura 57). Além do britador de rolos, podem-se utilizar britadores de martelo (Figura 58). Porém, o britador de rolos pode trabalhar em temperaturas mais elevadas, cerca de 800 °C, possui vida útil mais longa e

consome menos energia.

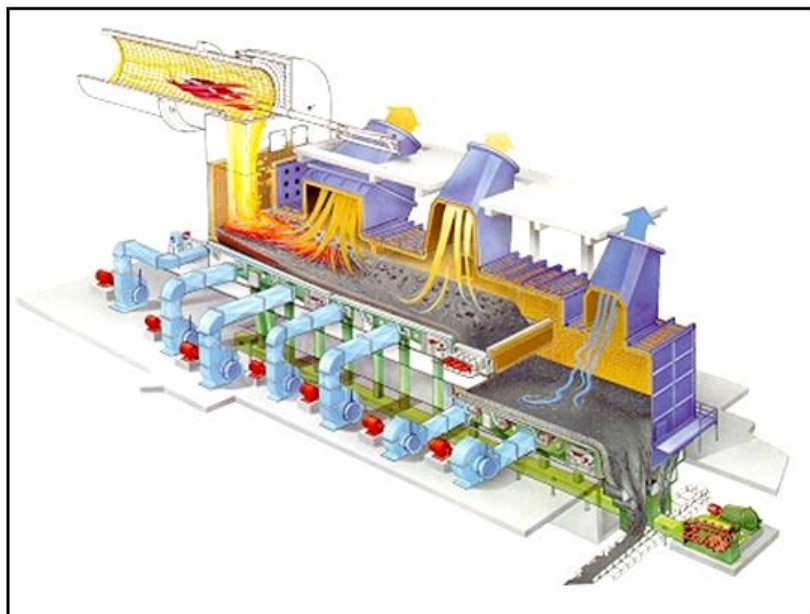


Figura 57 – Resfriador Claudius Peters
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)



Britador de Rolos



Britador de Martelo

Figura 58 – Britador de rolos e britador de martelos
Fonte: Votorantim Cimentos – Programa *Trainee* (2000)

2.4 Eficiência do Resfriador

A eficiência de um resfriador está relacionada com a quantidade de calor que pode ser recuperada. Para tanto se precisa saber a temperatura de saída do clínquer do forno. Como é difícil medir tal temperatura, adota-se o valor de 1450°C. Portanto, a eficiência dependerá da quantidade de ar secundário e terciário que sai do resfriador, bem como de suas temperaturas, da temperatura e quantidade do

excesso de ar e também da temperatura de saída do clínquer do resfriador.

A grelha de um resfriador pode ser dividida em três partes: a primeira corresponde ao ar secundário, a segunda corresponde ao ar terciário e a terceira corresponde ao ar de excesso. Em cada uma destas partes pode se determinar um fator de transferência de calor, denominado K. Na primeira parte da grelha, o fator é baixo por causa do ar frio que passa pelas laterais e também porque o clínquer está muito quente. Valores normais são da ordem de 0,23 a 0,35. O fator correspondente à segunda parte da grelha é mais alto, pois neste ponto se resfria o clínquer mais fino, e a troca térmica é mais efetiva. Valores de referência para este fator estão na ordem de 0,3 a 0,5. Ao final da grelha, o fator volta a ser baixo, pois neste ponto se resfriam as partículas mais grossas de clínquer. Como tais partículas apresentam uma grande temperatura no interior e a camada oferece menor resistência à passagem do ar, é necessária uma maior quantidade de ar para o resfriamento. Valores normais para o final da grelha estão entre 0,20 e 0,30.