

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**MATERIAIS REFRACTÁRIOS E PRÁTICAS OPERACIONAIS PARA AUMENTO
DE VIDA ÚTIL DOS CADINHOS PARA TRANSPORTE DE ALUMÍNIO**

Paulo Moreira Braga

São Carlos
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

**MATERIAIS REFRACTÁRIOS E PRÁTICAS OPERACIONAIS PARA AUMENTO
DE VIDA ÚTIL DOS CADINHOS PARA TRANSPORTE DE ALUMÍNIO**

Paulo Moreira Braga

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli

São Carlos
2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

B813mr

Braga, Paulo Moreira.

Materiais refratários e práticas operacionais para aumento de vida útil dos cadinhos para transporte de alumínio / Paulo Moreira Braga. -- São Carlos : UFSCar, 2011.

122 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Materiais refratários. 2. Manutenção. 3. Revestimentos.
I. Título.

CDD: 620.143 (20ª)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a meus pais, filhos, irmão e esposa.

VITAE DO CANDIDATO

Especialista em Gestão da Produção pela Universidade Federal de São Carlos (2004), Engenheiro Civil graduado pela Autarquia Municipal de Ensino de Poços de Caldas (1996) e Supervisor de Engenharia e Manutenção da Área de Redução do Alumínio da Alcoa Alumínio S.A – Unidade Poços de Caldas, MG.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE
PAULO MOREIRA BRAGA
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO
CARLOS, EM 26 DE JULHO DE 2011.

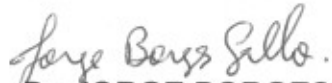
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. VICTOR CARLOS PANDOLFELLI
ORIENTADOR
PPG-CEM/ DEMA - UFSCar



Prof. Dr. TOMAZ TOSHIMI ISHIKWA
PPG-CEM/ DEMA - UFSCar



Dr. JORGE BORGES GALLO
Alcoa Alumínio S.A.

APROVADO / HOMOLOGADO / REFERENDADO
PELA CPG-CEM EM SUA REUNIÃO
Nº 531/11 DE 30 DE Julho DE 2011
SECRETARIA DO PPG-CEM

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e saúde e todo ensinamento que recebi. Também agradeço a minha família, meus pais Luiz e Maria, meu irmão Washington, minha esposa Maria José e meus filhos Flávia e Felipe pelo constante apoio que me deram para realização deste trabalho.

Agradeço a Alcoa Alumínio S.A. – Unidade Poços de Caldas – a Gerência de Operações e toda a equipe líder da Redução, em especial ao Affonso Bizon, Sílvio Porto, Júlio Costa, Jorge Gallo e Adail Dias pelo incentivo e pela oportunidade de executar e divulgar este trabalho, aos técnicos de manutenção de refratários Wolgram Tibúrcio, Ronaldo Lisboa e Job Siqueira que contribuíram de forma inequívoca e vibrante para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao Professor Dr. Victor Carlos Pandolfelli pelos ensinamentos, paciência, orientação e apoio incondicional no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho foram abordados os diversos fatores que afetam o desempenho do revestimento refratário de um cadinho cuja finalidade é transferir metal líquido entre as cubas eletrolíticas e os fornos de espera. Utilizando uma abordagem sistêmica, esta pesquisa teve como objetivo aumentar a vida útil dos cadinhos e conseqüentemente diminuir o custo de produção de alumínio. Considerando que, para um revestimento refratário as potenciais melhorias estão associadas a uma cadeia de itens que inclui a inspeção, os materiais, o projeto, a instalação, o aquecimento e a operação, tornou-se fundamental entender primeiramente o processo como um todo, antes de ser proposto qualquer tipo de alteração em itens específicos desta cadeia. Neste contexto, a primeira etapa de ajustes/melhorias do processo visou nortear ações para obter o máximo de vida útil do material refratário que estava sendo utilizado. Após a implantação foi realizada uma avaliação da eficácia das ações para minimização dos mecanismos de desgaste do refratário. Uma análise post-mortem também foi efetuada em três cadinhos procurando identificar os gargalos que ainda limitam a vida útil do revestimento refratário. Os resultados obtidos neste trabalho resultaram em um aumento médio de 83% na vida útil do refratário. Dos cadinhos disponíveis, 91% deles conseguiram efetuar mais de 400 corridas, sendo que antes das melhorias este número era de apenas 9%. Adicionalmente, o número máximo de corridas por cadinho subiu 53% (de 467 para 715). Além de aumentar a disponibilidade dos cadinhos este significativo aumento de desempenho do refratário trouxe como ganho financeiro uma redução de 47% no custo anual de manutenção e pré-aquecimento do refratário. A medição do grau de sucesso das etapas deste trabalho foi fundamental para direcionamento dos passos seguintes, visando à melhoria contínua do desempenho do material refratário e aumento da competitividade.

REFRACTORY MATERIALS AND OPERATING PRACTICES TO INCREASE THE LIFE CYCLES OF LADLES FOR ALUMINUM TRANSPORTATION

ABSTRACT

The work described in this study deals with the several different factors that affect the performance of refractory lining in the ladles that transfer aluminum molten metal from electrolytic cells (pots) to a holding furnace. By using a systemic approach the work had the objective of increasing the life cycle of these ladles and consequently to reduce the cost of producing aluminum metal. Considering that for refractory lining the potential improvements are associated with a chain of items that include inspection, materials, engineering project design, installation, heating and operation, it is therefore fundamental to primarily understand the process in its entirety before proposing any type of change in the specific items of that chain. Within that context the first step of adjustments/improvements in the process pursued actions to extend the life cycle for the refractory materials that were being used. After implementing those adjustments and improvements an evaluation was performed on the efficiency of the actions for minimizing the mechanisms of wear on the refractories. An autopsy analysis was also carried out in three laddles to identify the bottlenecks that still limited the life cycle of the refractory lining. Results showed that the work culminated in an average increase of 83% in the life cycles of the refractories. Considering the ladles available for implementing improvements, 91% were able to perform more than 400 metal runs, whereas before improvements only 9% were making more than 400 runs. Additionally, the maximum number of runs per laddle increased by 53%, from 467 to 715. Besides the increase in availability of the ladles, this significant increase in the performance of the refractories brought financial gains in reducing by 47% the annual maintenance and pre-heating costs of the refractories. The measuring of the degree of success of the steps performed in the work was fundamental for orientating each following step within the intent to obtain a continuous improvement of the refractory materials and an increase in the level of competitiveness.

PUBLICAÇÕES

[1] BRAGA, P.M.; BRAÚLIO, M.A.L.; GALLO, J.B.; PANDOLFELLI, V.C.,
Materiais refratários e práticas operacionais para aumento de vida útil dos
cadinhos para transporte de alumínio . IN: V CONGRESSO INTERNACIONAL
DO ALUMÍNIO, 2012, São Paulo, **Anais...** São Paulo, 2012. 14p.

[2] BRAGA, P.M.; GALLO, J.B.; PANDOLFELLI, V.C., Refractory Materials and
Operating Practices to Increase. In: THE MINERALS, METAL AND
MATERIALS SOCIETY, 2012 , Orlando, **Anais...** Orlando: TMS 2012. 6 p.

SUMÁRIO

	Pág.
BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 Bauxita	7
4.2 Alumina	7
4.2.1 Processo Bayer	8
4.3 Alumínio	9
4.3.1 Processo Hall-Herout	10
4.4 Cadinho	12
4.5 Materiais Refratários	15
4.5.1 Classificação dos Materiais Refratários	16
4.5.1.1 Classificação quanto aos constituintes e a natureza química e minerológica dos constituintes	17
4.5.1.2 Classificação quanto à conformação	17
4.5.1.2.1 Refratários formados	17
4.5.1.2.2 Refratários não formados ou monolíticos	18
4.5.1.2.3 Cura e secagem de materiais refratários	20
4.5.1.3 Classificação quanto à condutividade térmica	21
4.5.2 Propriedades dos Materiais Refratários	22
4.5.2.1 Propriedades Físicas	22

4.5.2.2 Propriedades Térmicas	23
4.5.2.3 Propriedades Químicas	23
4.5.2.4 Propriedades Mecânicas	24
4.5.3 Refratários utilizados na indústria do alumínio	25
4.5.3.1 Refratários utilizados em cadinhos	26
4.6 Análise sistêmica sobre materiais refratários para cadinho	27
4.6.1 Considerações Termodinâmicas	27
4.6.2 Considerações Cinéticas	31
4.6.2.1 Agentes Anti-molhantes	33
4.6.3 Aspectos Microestruturais	34
5 MATERIAIS E MÉTODOS	41
5.1 Primeira Etapa	41
5.1.1 Metodologia para abordagem dos problemas existentes	42
5.1.1.1 Processo de limpeza	42
5.1.1.2 Aplicação/Manutenção do refratário	42
5.1.1.3 Pré-aquecimento do Refratário... ..	43
5.1.2 Procedimento de inspeção de vida útil do refratário	43
5.1.2.1 Inspeções Termográficas	44
5.1.2.1.1 Metodologia de realização da inspeção	45
5.1.2.1.2 Relatório da inspeção termográfica	47
5.1.2.2 Análise post mortem	47
5.1.2.2.1 Metodologia de realização da inspeção	49
5.1.2.2.2 Relatório da análise post mortem	50
5.1.3 Avaliação das melhorias do desempenho e custo de manutenção do refratário.....	50
5.2 Segunda Etapa	51
5.2.1 Teste para avaliação de materiais refratários	52
5.2.1.1 Resistência a compressão uniaxial a temperatura ambiente (RCTA)..	52
5.2.1.2 Resistência a flexão em 3 pontos a alta temperatura (MOR)	52
5.2.1.3 Porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA)	53
5.2.1.4 Resistência a erosão.....	53
5.2.1.5 Resistência ao choque térmico	54

5.2.1.6 Permeabilidade de refratário ao ar em baixa temperatura	54
5.2.1.7 Refratariedade sob carga	55
5.2.1.8 Condutividade térmica	56
5.2.1.9 Ensaio de “cup test”	57
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
6.1 Limpeza do Cadinho	59
6.1.1 Limpeza manual a frio	62
6.1.2 Limpeza manual a quente	62
6.1.3 Limpeza mecânica a quente	63
6.2 Aplicação / manutenção do refratário	68
6.3 Primeira Etapa de Melhorias	70
6.3.1 Manutenção preventiva e preditiva de refratário	71
6.3.2 Nivelamento técnico dos aplicadores de refratário	71
6.3.2.1 Procedimento padrão para aplicação de refratários	73
6.3.3 Concretagem do fundo do cadinho	77
6.3.4 Pré-aquecimento do refratário	80
6.3.4.1 Pré-aquecimento a gás	84
6.3.4.2 Pré-aquecimento elétrico	92
6.3.4.3 Matriz de decisão para definição do sistema de aquecimento	95
6.3.5 Avaliação da vida útil do refratário	97
6.3.5.1 Inspeções termográficas	97
6.3.5.2 Análise post mortem... ..	102
6.3.5.2.1 Avermelhamento da estrutura metálica do cadinho	104
6.3.5.2.2 Espessura do refratário	106
6.3.5.2.3 Infiltração de metal entre a borda e a parede refratária	106
6.3.5.2.4 Avaliação da análise post mortem	107
6.3.5.3 Avaliação dos resultados obtidos após implantação de melhorias ...	108
6.4 Segunda etapa de melhorias	110
7 CONCLUSÕES	113
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	117
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 4.1 – Classificação dos refratários quanto aos constituintes e a Natureza mineralógica.....	17
Tabela 4.2 – Série eletromotiva ou eletroquímica de alguns metais a 1300° K [17].....	28
Tabela 6.1 – Sumário do relatório de manutenção de cadinhos [32].....	70
Tabela 6.2 – Sumário do relatório de manutenção de cadinhos antes dos ajustes no pré-aquecedor [34].....	87
Tabela 6.3 – Sumário do relatório de manutenção de cadinhos depois dos ajustes no pré-aquecedor [34] ...	89
Tabela 6.4 – Balanço energético de calor absorvido pelo refratário.....	90
Tabela 6.5 – Sumário dos custos de secagem antes e depois dos ajustes.....	91
Tabela 6.6 – Sumário do custo de secagem utilizando energia elétrica.....	94
Tabela 6.7 – Comparativo de custo dos sistemas de aquecimento a gás e elétrico.....	97
Tabela 6.8 – Critério de medições termográficas para acompanhamento de vida útil do refratário de cadinho.....	102
Tabela 6.9 – Relação de cadinhos para análise post mortem.....	102
Tabela 6.10 – Porcentagem de redução de espessura do refratário.....	106
Tabela 6.11 – Sumário do relatório de manutenção de cadinhos depois dos ajustes [34].....	109
Tabela 6.12 – Demonstrativo de ganhos financeiros da 1ª etapa de melhorias.....	109
Tabela 6.13 – Sumário da ficha técnica dos atuais refratários utilizados nos cadinhos.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 – Tópicos de estudo para análise sistêmica do revestimento refratário de cadinhos	2
Figura 4.1 – Fluxograma geral do processo Bayer [4].....	9
Figura 4.2 – Fluxograma de produção de alumínio [4]	10
Figura 4.3 – Cadinho sendo içado por ponte rolante	13
Figura 4.4 – Gráfico da série eletroquímica de estabilidade dos óxidos frente ao alumínio a 1300° K [18]	29
Figura 4.5 – Comportamento do ângulo de contato entre metal e refratário ...	32
Figura 4.6 – Processo de fabricação dos materiais refratários	35
Figura 4.7 – Grau de penetração do alumínio pelo refratário	38
Figura 5.1 – Detalhe do posicionamento e pontos do cadinho para inspeção termográfica	46
Figura 5.2 – Detalhe dos locais para inspeção do cadinho	49
Figura 5.3 – Esquema do ensaio de permeabilidade	55
Figura 5.4 – Esquemático de entalhes e montagem dos tijolos para a medida de condutividade térmica	56
Figura 5.5 – Esquema de corpo de prova para teste	57
Figura 6.1 – Ilustração do relatório de limpeza de cadinho [30]	60
Figura 6.2 – Detalhe da limpeza do cadinho acima de 400° C	61
Figura 6.3 – Detalhe da uniloder realizando limpeza de cadinho	63
Figura 6.4 – Detalhe da retroescavadeira efetuando limpeza de cadinho	64
Figura 6.5 – Detalhe da retroescavadeira utilizando martetele	66
Figura 6.6 – Desenho de uma máquina automática de limpeza de cadinho [32].....	67
Figura 6.7 – Detalhe da fresa de uma máquina automática de limpeza de cadinho [33].....	67
Figura 6.8 – Elevação em corte com detalhes do cadinho	69
Figura 6.9 – Detalhe externo do cadinho em manutenção	72
Figura 6.10 – Detalhe interno do cadinho em manutenção	72
Figura 6.11 – Concreto com água em excesso [27]	74

Figura 6.12 – Concreto com baixa consistência de água [27]	74
Figura 6.13 – Detalhe da forma do fundo do cadinho montada externamente	79
Figura 6.14 – Detalhe da fixação/ajuste horizontal da forma no interior do cadinho	79
Figura 6.15 – Detalhe da fixação vertical da forma do cadinho	80
Figura 6.16 – Detalhe da tampa de um cadinho [41]	86
Figura 6.17 – Detalhe da tampa sobre o cadinho [41]	86
Figura 6.18 – Ilustração do relatório de manutenção de cadinhos antes dos ajustes no pré-aquecedor [34].....	87
Figura 6.19 – Detalhe do fundo do cadinho após a explosão do refratário	88
Figura 6.20 – Ilustração do relatório de manutenção de cadinhos depois dos ajustes no pré-aquecedor [34].....	89
Figura 6.21 – Ilustração de uma tampa antes de colocar sobre o cadinho	93
Figura 6.22 – Ilustração de várias tampas resistivas instaladas sobre cadinhos.....	94
Figura 6.23 – Detalhe dos pontos do cadinho para inspeção termográfica ...	98
Figura 6.24 – Termografia do ponto B após 03 corridas de metal (temp. máx = 161.9° C)	98
Figura 6.25 – Termografia do ponto A após 290 corridas de metal (temp. max = 242° C)	99
Figura 6.26 – Termografia do ponto B após 425 corridas de metal (temp. máx = 349° C)	99
Figura 6.27 – Termografia do ponto E após 545 corridas de metal (temp. máx = 439° C)	100
Figura 6.28 – Termografia do ponto E após 669 corridas de metal (temp. máx = 546.7° C)	101
Figura 6.29 – Detalhe dos locais de inspeção do cadinho	103
Figura 6.30 – Detalhe interno dos cadinhos 7 e 10 mostrando desprendimento de refratário e exposição da chapa metálica	104
Figura 6.31 – Limpeza de cadinho na região do bico	105
Figura 6.32 – Detalhe da interface parede refratária e borda metálica do cadinho	107

Figura 7.1 – Tópicos de estudo para análise sistêmica do revestimento refratário de cadinho115

SÍMBOLOS E ABREVIações

ASTM	Órgão original dos Estados Unidos para normalização para produtos.
DIN	Instituto alemão para padronização de produtos, especificações de Materiais, normas de segurança, métodos de testes, entre outros.
g/cm ³	Gramas por metro cúbico
FQ	Fio quente
GLP	Gás Liquefeito de petróleo
ISO	Organização internacional para padronização
Kcal	Quilo caloria é uma unidade de medida de energia
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
k ₁	Constante de permeabilidade de efeitos viscosos (m ²)
k ₂	Constante de permeabilidade de efeitos inerciais (m)
L	Espessura do corpo de prova (mm);
MOR	Módulo de ruptura (MPa)
MO _{x(s)}	Óxido metálico
MPa	Mega Pascal
mW*h	Mega watt hora
P	Pressão a uma determinada vazão de ar (atm);
Pa	Pascal é uma unidade de medida de pressão
P _i	Pressão absoluta na entrada da amostra (atm)
P _o	Pressão absoluta na saída da amostra (atm)
s	Segundo é uma unidade de medida de tempo
V _s	Velocidade do fluido (m/s)
W/mK	Watt por metro Kelvin
°C/min	Graus centígrados por minuto
ΔG	Variação da energia livre de Gibbs (joules)
η	Viscosidade do metal (Pa.s)
μ	Viscosidade do ar (Pa.s)
θ	Ângulo de contato (°) entre o metal e o refratário

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, contudo não é encontrado em estado puro e sim na forma de óxidos e silicatos, devido a sua grande afinidade por oxigênio. Sendo assim somente no final do século XIX foi possível a sua produção em escala industrial. A obtenção do alumínio a um custo mais baixo e economicamente viável foi possível após a conjunção de três inventos:

- Processo Bayer, que aborda a extração e refino da bauxita para a produção de alumina (óxido de alumínio - Al_2O_3).
- Processo Hall – Heroult, que envolve a conversão eletrolítica da alumina em alumínio metálico
- Desenvolvimento de tecnologias de geração e distribuição de energia elétrica.

O processo Hall – Heroult de metalurgia do alumínio por eletrólise é realizado por meio de dissolução da alumina em um banho criolítico no interior de células eletrolíticas ligadas em série. Durante a eletrólise, o alumínio vai se depositando no fundo da cuba eletrolítica, onde é extraído em intervalos regulares, por meio de um sistema de sucção ou sifonamento, para o interior de um cadinho revestido por materiais refratários.

Além de armazenar o alumínio líquido extraído da cuba a uma temperatura próxima a 1000 °C, o cadinho possui também a função de transporte do metal até os fornos de espera. Estas duas importantes funções no processo produtivo do alumínio tornam o cadinho um equipamento crítico, necessitando uma elevada confiabilidade operacional. Uma falha funcional do revestimento refratário pode resultar na infiltração de metal até a carcaça metálica, fazendo com que a temperatura de parede do equipamento supere os níveis aceitáveis, ocasionando a parada do equipamento com riscos de segurança e perdas de produção. Este tipo de falha, além de causar atrasos operacionais, aumenta o custo de manutenção do cadinho. Considerando-se

este contexto, o revestimento refratário do cadinho requer atenção especial e deve ser analisado de forma sistêmica.

A Alcoa Alumínio S.A, empresa parceira deste trabalho, não produz refratários, mas deve estar qualificada para melhor seleção e busca de elevado desempenho, uma vez que os materiais são apenas um item de uma cadeia representada na Figura 1.1. Sendo assim, a fim de atuar nesta cadeia e propor qualquer melhoria para aumentar a vida útil do refratário do cadinho e reduzir o custo de produção de alumínio, é fundamental o entendimento do processo como um todo.



Figura 1.1 Tópicos de estudo para análise sistêmica do revestimento refratário de cadinhos.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- Entender os processos que afetam o desempenho do cadinho de uma forma sistêmica.
- Acompanhar e analisar a preparação e aplicação do refratário, operação e limpeza do cadinho.
- Conhecer os mecanismos de desgaste do refratário por meio da análise post mortem.
- Entender a importância de cada propriedade dos materiais refratários.
- Propor a implantação de melhorias nas práticas operacionais, instalação/manutenção do refratário e no seu sistema de tratamento térmico.
- Avaliar as melhorias implantadas por meio de análise de custos/desempenho.
- Definir quais propriedades dos refratários serão necessárias para atender aos requisitos para a preparação de um adequado processo de qualificação e seleção de materiais refratários para o cadinho.

3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Os materiais refratários originalmente utilizados no revestimento dos cadinhos da planta da empresa parceira tiveram seu projeto baseado em outros existentes, principalmente dos Estados Unidos. Com o passar dos anos, visando-se reduzir custos, os materiais importados utilizados nestes cadinhos foram substituídos por nacionais. No entanto, provavelmente devido à falta de aprimoramento técnico de como especificar e qualificar um material refratário, esta prática ocorreu de forma aleatória, sem entendimento do processo como um todo e sem maiores critérios de seleção, aplicação, inspeção e tratamento térmico. Somado a estes aspectos, verifica-se ainda os mecanismos de desgaste do refratário que podem ser divididos em ataque químico, impacto durante a limpeza e choque térmico [1]. É importante ressaltar que a deformação causada pelo içamento, devido aos ciclos de carregamento e descarregamento de metal, torna-se desprezível devido à estrutura metálica do cadinho ser super dimensionada. O resultado da somatória de todos os problemas anteriormente citados traduz-se em várias paradas não programadas do cadinho, gerando um elevado custo anual de manutenção de refratário.

Neste contexto, visando-se melhorar o desempenho do refratário e por consequência reduzir o custo de produção do alumínio, é de suma importância para o presente trabalho a realização de uma análise sistêmica do revestimento refratário dos cadinhos, contemplando os seguintes itens:

- Inspeção;
- Materiais;
- Projeto;
- Instalação;
- Aquecimento;
- Operação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Bauxita

Matéria prima utilizada na obtenção da alumina e conseqüentemente do alumínio, a bauxita contém de 30 a 60% de alumina (Al_2O_3) combinada com quantidades menores de sílica, titânia e óxidos de ferro, assim como outros traços de impurezas. Como fontes de hidróxido de alumínio, na bauxita podem existir três tipos diferentes de minerais: gibsite, boemita e diáspora [2, 3].

Este minério pode ser encontrado em três grupos climáticos: Mediterrâneo, Tropical e Subtropical [4]. As principais reservas podem ser encontradas na Austrália, Brasil, Guiné e Jamaica, ocupando o Brasil a quarta posição na classificação mundial de produção e a terceira em reservas de bauxita [4].

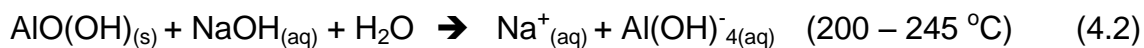
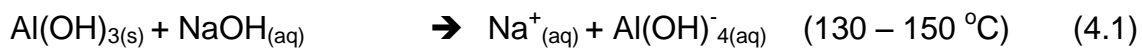
4.2 Alumina

Após a mineração, a bauxita é refinada até a obtenção da alumina (Al_2O_3) a partir do processo Bayer. Este processo foi desenvolvido e patenteado por Karl Josef Bayer em 1888 [2, 3, 4].

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de alumina. Em 2009 sua produção foi próxima a 8,7 milhões de toneladas [4], sendo a empresa parceira responsável pela segunda maior produção brasileira, o que equivale a aproximadamente 1,1 milhões de toneladas (80% desta produção correspondeu à unidade de São Luís – MA e 20% a unidade de Poços de Caldas - MG). Neste mesmo ano, a Alunorte, maior empresa da área no Brasil, produziu 68% da alumina nacional, o que equivale a aproximadamente 5,9 milhões de toneladas [4]. Já a CBA, terceira maior empresa, cuja produção foi de 819 mil toneladas, foi responsável por 9,4% da produção de alumina [4].

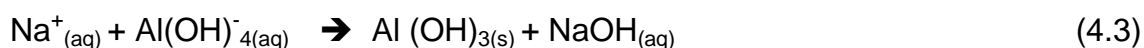
4.2.1 Processo Bayer

Conforme mencionado anteriormente, é por meio do Processo Bayer que se obtém a alumina após refino da bauxita. Este processo se inicia com a moagem da bauxita, que é em seguida digerida na presença de hidróxido de sódio (NaOH – soda caustica) a alta pressão e em temperaturas de até 245 °C, para formar uma solução de aluminato de sódio. Devido às diferenças mineralógicas da bauxita, podem ser observados dois tipos de reações químicas [3]:



Nesta etapa, chamada de digestão ou extração, a maior parte das espécies minerais que contém o alumínio é dissolvida, deixando um resíduo insolúvel (chamado, na indústria de produção de alumínio, de lama vermelha ou “*red mud*”). Esse resíduo é removido por sedimentação e filtração na etapa de Clarificação e depositados em área de disposição de resíduos. A porção líquida filtrada é denominada licor verde [3].

Após esta última etapa, o licor verde é resfriado e, a baixas temperaturas, particularmente na presença de sementes de hidróxido de alumínio, este é precipitado e o processo da digestão é revertido segundo a reação química a seguir [3]:



Na sequência da precipitação e antes de ser convertido em alumina, o hidróxido de alumínio é lavado, filtrado, seco e em seguida calcinado a temperaturas entre 1000 e 1300 °C. Após esta calcinação é obtida a alumina, matéria prima indispensável na produção do alumínio. A equação 3.4 mostra a reação química característica [3]:



O fluxograma da Figura 4.1 demonstra de maneira resumida todo processo descrito anteriormente [4].

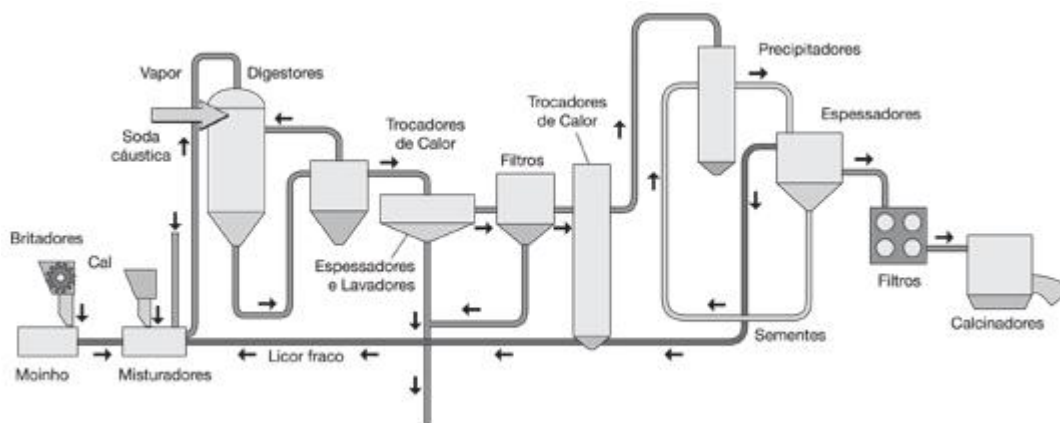


Figura 4.1 Fluxograma geral do processo Bayer [4].

4.3 Alumínio

Após a calcinação e resfriamento a temperaturas inferiores a 100 °C, a alumina está pronta para ser transformada em alumínio metálico por meio do processo eletrolítico de Hall – Heroult. A metalurgia do alumínio por eletrólise se faz necessária, devido à elevada afinidade deste metal com o oxigênio, o que o torna difícil encontrá-lo em estado elementar, mas sim em formas combinadas como óxidos ou silicatos, conhecidos também por bauxita [2].

O alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre com aproximadamente 8,1% em massa [2]. Ele é um metal leve, mole, maleável, dúctil, prateado, com alta condutividade elétrica e boa resistência à corrosão [5]. Estas características o tornam de grande utilidade na indústria de transporte (automóveis, aeronaves, trens, navios), de construção civil (portas, janelas), de eletro-eletrônicos e de transmissão de energia. O alumínio também está presente em eletrodomésticos, brinquedos, utensílios de cozinha, embalagens de alimentos, latas de refrigerantes e cervejas, produtos de higiene, cosméticos e produtos farmacêuticos. Este metal também tem papel

relevante do ponto de vista econômico, social e ambiental por meio da reciclagem das embalagens de alumínio, setor no qual o Brasil se destaca. Assim é apresentado na Figura 4.2, de forma resumida, o fluxo de produção de alumínio:

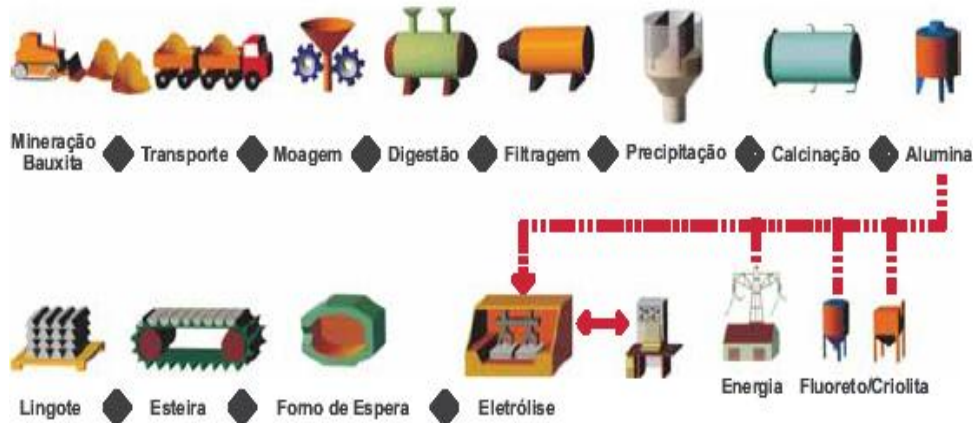


Figura 4.2 Fluxograma de produção de alumínio [4].

De acordo com a Abal [4], em 2010, com uma produção de 1,54 milhões de toneladas, o Brasil foi o sétimo maior produtor mundial de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Canadá, Austrália, Estados Unidos e Índia. A empresa parceira deste trabalho é a terceira maior produtora de alumínio primário do país, e sua produção de aproximadamente 350 mil toneladas anuais é dividida entre as unidades de São Luís (75%) e Poços de Caldas (25%). Dados também da Abal [4] informam que os dois maiores produtores de alumínio primário do Brasil são CBA e Albrás e, em 2010, suas respectivas produções foram de 472 mil e 451 mil toneladas. Estes três maiores produtores de alumínio são responsáveis por aproximadamente 83% da produção nacional.

4.3.1 Processo Hall-Heroult

Como mencionado anteriormente, este é o processo de obtenção de alumínio metálico pela redução da alumina dissolvida em banho eletrolítico. O

processo Hall-Heroult foi desenvolvido quase que simultaneamente por Charles Martin Hall e Paul Louis Toussaint Heroult, nos Estados Unidos e na França, respectivamente, no final do século XIX (1886).

Este processo tornou economicamente viável a produção em escala industrial de um metal anteriormente tido como nobre e de altíssimo custo. Isto se deu principalmente devido a sua produtividade e características operacionais. Dependendo da eficácia do processo, com uma quantidade de 1,89 kg de alumina é possível produzir 1 kg de alumínio [2].

Analisando-se quimicamente o processo, pode-se observar que os átomos de Al que compõem a alumina calcinada (óxido de alumínio– Al_2O_3) se apresentam neste composto com carga positiva (Al^{3+}). Para alcançar a condição de metal é necessário que cada cátion de alumínio receba 3 elétrons e seja reduzido para alumínio (Al^0). Para tanto, utiliza-se uma reação de oxirredução. Estas reações se processam no interior de cubas eletrolíticas ligadas em série em um circuito elétrico, em que o anodo é composto por uma pasta compacta de carbono e o catodo é o próprio alumínio depositado no fundo da cuba.

O anodo tem um importante papel no desempenho da cuba de alumínio, uma vez que, no decorrer da eletrólise, o mesmo é consumido. Dessa maneira, o material utilizado como anodo deve ter alto grau de pureza para evitar a contaminação do alumínio [6].

A energia elétrica exerce a principal função na quebra da estrutura do óxido e liberação dos átomos de Al para que os mesmos possam se agrupar na forma metálica. Dependendo do projeto, a corrente elétrica para as cubas varia de 50 a 300 KA (Kiloampères) [2].

Visando-se facilitar e aperfeiçoar as condições operacionais, é adicionado de 2 a 4% de alumina em um banho eletrolítico com 73 - 86% de criolita (fluoreto + sódio), que atuará dissolvendo a alumina e aumentando a condutividade elétrica do sistema. O banho é composto adicionalmente de 6 a 13% de fluoreto de alumínio (AlF_3), 4 a 6% de fluoreto de cálcio (CaF_2). Em alguns casos contém 2 a 4% de fluoreto de lítio e/ou de magnésio [7,9]. Além de atuar como eletrólito, o banho auxilia na formação de fase líquida em

temperaturas próximas a 970 °C, permitindo assim a adição de mais alumina e garantindo a continuidade do processo. É importante ressaltar o quanto esta temperatura é economicamente favorável, visto que o ponto de fusão da alumina é da ordem de 2050 °C. A reação química principal do processo pode ser escrita de acordo com a equação 4.5 [4].



Após a dissolução da alumina, o alumínio, na fase líquida, vai se depositando na parte inferior das cubas eletrolíticas, de onde, em intervalos regulares, é sifonado diretamente nos cadinhos. Após quantidades pré-determinadas de metal ser extraída de cada cuba e atingida a capacidade máxima permitida do cadinho, ocorre a transferência de alumínio até os fornos de espera por meio de pontes rolantes e/ou veículos especiais para tal atividade.

4.4 Cadinho

Indispensável na indústria do alumínio para transferência de metal, o cadinho é um recipiente que geralmente possui uma carcaça feita de aço, com formato cilíndrico vertical, mas podendo também ter formato horizontal, denominado neste caso de carro torpedo [7].

Este recipiente precisa ser robusto o suficiente para conter o carregamento de metal, assim como apresentar resistência adequada para suportar tensões as quais ele é exposto (geralmente peso e içamento). Quando exposta à temperatura elevada, a carcaça metálica está sujeita principalmente à fluência, fragilização, descarbonetação e oxidação [8]. Visando-se evitar grandes perdas de temperatura do metal, reduzir a temperatura da parede externa e possibilitar a utilização de materiais metálicos mais baratos, utiliza-se, entre o metal fundido e a carcaça de aço do cadinho, um material refratário com espessuras determinadas de acordo com as solicitações de projeto. Essa

redução no perfil de temperatura do cadinho é decorrente da baixa condutividade térmica que o material isolante possui.

Atualmente na planta da empresa parceira utilizam-se 11 cadinhos e 04 tampas para transferência de alumínio das cubas eletrolíticas até os fornos de espera. O sistema pneumático de sifonamento, responsável pela sucção de metal da cuba, é montado sobre a tampa. Transportado por pontes rolantes, conforme Figura 4.3, o cadinho deve ter sua tampa retirada para facilitar vertimento do metal no forno. Estes cadinhos transportam cerca de cem mil toneladas de alumínio anualmente, ressaltando a importância dos revestimentos refratários serem corretamente especificados, instalados e acompanhados durante a sua vida útil, de modo a evitar falha no recipiente.

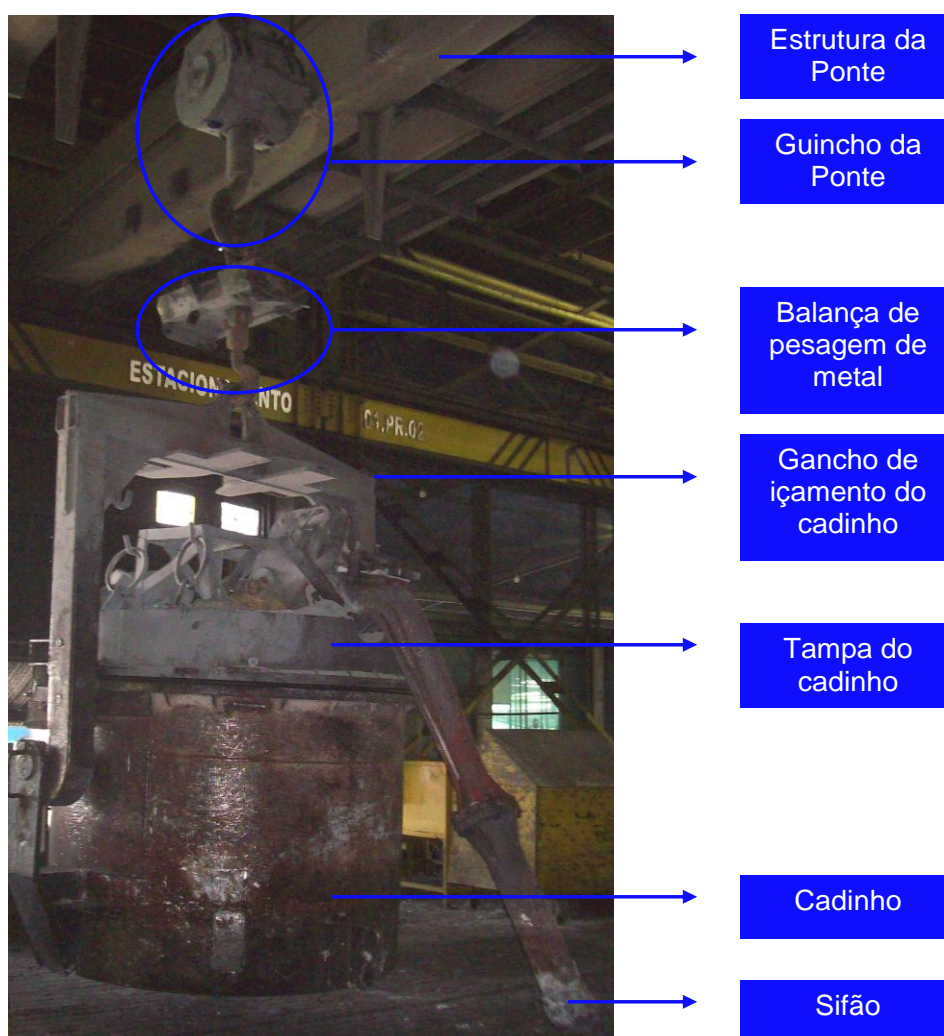


Figura 4.3 Cadinho sendo içado por ponte rolante

Analisando vários projetos de cadinhos existentes nas fábricas da empresa parceira no mundo pode-se concluir que, apesar de existir similaridade entre eles, não há consenso para o formato do fundo, pois estes são encontrados na forma plana e côncava. Atualmente na planta da empresa parceira utilizam-se cadinhos com fundo côncavo. Comparando os projetos de ambos os formatos, pode-se observar que cadinhos com fundo plano são mais robustos estruturalmente do que os que apresentam fundo côncavo. Beer e Johnston Jr [9] explicam o motivo desta diferença. Segundo estes autores, ao contrário das superfícies planas, as superfícies côncavas apresentam distribuição de tensões uniformes.

A desvantagem da concepção côncava do fundo do cadinho é observada no momento da concretagem, já que o efeito da força gravitacional exige a utilização de formas no fundo quando se aplicam concretos vertidos e vibrados. Esta necessidade, além de dificultar a concretagem, provoca uma maior demanda de tempo na aplicação do concreto refratário.

É importante ressaltar que a manutenção do revestimento refratário torna-se necessária todas as vezes que ele não está isolando termicamente dentro dos limites de projeto, colocando em risco a segurança do processo, dos operadores e do desempenho do equipamento. Visando retornar ou manter o equipamento dentro das especificações de projeto, podem-se efetuar manutenções corretivas, preventivas e preditivas. Bernardes [10] e Lafraia [11] definem estas manutenções da seguinte forma:

- **Manutenção Corretiva:** Constitui a forma mais onerosa de manutenção, do ponto de vista total do sistema. É a manutenção efetuada sem nenhuma programação prévia, ocorre em momentos aleatórios e, muitas vezes, inoportunos, por corresponderem a épocas de picos de produção ou períodos de cronograma restrito. Nos cadinhos, este tipo de manutenção se faz necessária após o final de vida útil do material refratário e/ou um desgaste prematuro, causado principalmente na operação de limpeza ou alguma falha de montagem. Este tipo de falha geralmente provoca avermelhamento da carcaça metálica, podendo, em

casos mais críticos, ser seguido de vazamento de metal.

- **Manutenção Preventiva:** Como o próprio nome sugere, consiste em um trabalho de prevenção de falhas que possam originar a parada ou um baixo rendimento do equipamento em operação. Esta prevenção é feita baseada em estudos estatísticos, considerando o estado do equipamento, local de instalação e dados fornecidos pelo fabricante. No cadinho, é possível a utilização deste tipo de manutenção por meio de um estudo estatístico baseado na confiabilidade do refratário. Como vantagens da manutenção preventiva pode-se citar:
 - Diminuição do número total de intervenções corretivas, principalmente em períodos noturnos e finais de semanas ou feriados.
 - Aumento da disponibilidade do equipamento em operação.
 - Redução do custo de manutenção.
- **Manutenção Preditiva:** O objetivo deste tipo de manutenção é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas por meio de acompanhamento de um tipo de parâmetro, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível. Este acompanhamento obedece a uma sistemática baseada em uma modificação de parâmetro de condição ou desempenho, permitindo a preparação prévia do serviço (manutenção preventiva), além de outras decisões e alternativas relacionadas com a produção. Este tipo de manutenção, no cadinho, previne falha no refratário por meio do acompanhamento do parâmetro “temperatura de carcaça metálica do cadinho”.

4.5 Materiais refratários

Materiais refratários são materiais cerâmicos, fabricados a partir de minerais, com alto ponto de fusão, classificados por óxidos e não óxidos de acordo com a base da matéria prima. Os principais materiais óxidos refratários

são o MgO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, ZrO₂, Cr₂O₃ ou combinações destes, enquanto os mais importantes materiais não óxidos são compostos dos elementos C, Si, B e N [12].

Materiais refratários devem ser resistentes ao calor e exposição a diferentes graus de estresse e tensão mecânica, térmica e química, além de abrasão mecânica a várias temperaturas sem perder suas características funcionais, incluindo estabilidade volumétrica e estrutural [13]. Para resistir a estas solicitações, uma criteriosa seleção de materiais deve ser feita visando-se atender aspectos de elevada refratariedade (acima de 1100 °C), estabilidade mecânica, química e dimensional, somado à baixa condutividade térmica e baixa permeabilidade [10].

Várias especificações de materiais refratários são encontradas no mercado, porém a correta definição do material a ser utilizado depende do objetivo que esse material deverá atender durante a operação do equipamento. Logo o grande desafio tecnológico é conciliar e aperfeiçoar as diversas propriedades para melhor alcançar os objetivos que o respectivo material se propõe. No entanto, além de corretamente especificados e também instalados, é fundamental o acompanhamento da vida útil do refratário, de modo a evitar falhas no equipamento.

Atualmente, aproximadamente 70% dos materiais refratários são utilizados na indústria de metal básico [13]. Sendo uma consumidora em crescimento, a indústria do alumínio utiliza estes materiais principalmente em calcinadores de alumina, fornos de cozimento de anodo, cubas eletrolíticas, fornos de espera e cadinhos de transferência de alumínio líquido.

4.5.1 Classificação dos materiais refratários

Além de óxidos e não óxidos, de acordo com Bernardes [10] os materiais cerâmicos devem ser classificados quanto aos constituintes, natureza química e mineralógica dos constituintes, forma e quanto à condutividade térmica.

4.5.1.1 Classificação quanto aos constituintes e a natureza química e mineralógica

A Alumina (Al_2O_3) e a Sílica (SiO_2) são os principais constituintes dos materiais refratários. Seus teores influenciam diretamente o bom desempenho do material refratário em função do meio a que está sujeito. Quanto maior o teor de alumina, para as mesmas condições de granulometria e queima, maior será a massa específica aparente e mais denso será o material. Sendo assim a classificação quanto aos constituintes e a natureza mineralógica pode ser feita conforme Tabela 4.1 [10] a seguir.

Tabela 4.1 Classificação dos refratários quanto aos constituintes e a natureza mineralógica

Constituintes	Silicosos	Silico-Aluminosos	Aluminosos	Básicos
	Sílica > 90% SiO_2 Semi-Sílica: Al_2O_3 de 20 a 30% SiO_2 de 60 a 80%	Al_2O_3 de 30 a 50% SiO_2 de 40 a 65%	Al_2O_3 > 48% SiO_2 < 46%	Magnésia - MgO Cromita - Cr_2O_3 Outros
Natureza química e mineralógica	Ácidos	Neutros	Básicos	Especiais
	Predomina SiO_2 (silicosos) Compatíveis com meios quimicamente ácidos	Predomina Al_2O_3 ou Cr_2O_3 Compatíveis com meios quimicamente neutros	Predomina os magnesianos ou cromo-magnesianos. Compatíveis com meios quimicamente neutros	Carbeto de Silício, Mullita, etc.

4.5.1.2 Classificação quanto à conformação

Quanto à conformação, os refratários podem ser divididos em formados e não formados. A definição de cada tipo com respectivas subdivisões encontra-se a seguir [10, 12, 13, 14].

4.5.1.2.1 Refratários formados

Materiais refratários formados ou tijolos são materiais que têm forma

geométrica definida e podem ser queimados, não queimados e eletrofundidos. Geralmente estes materiais são fabricados por prensagem dentro de um molde, de uma mistura de matéria prima, seguido por secagem e queima. Já quando a fabricação é por fusão, resfria-se em um molde a mistura de matéria prima que foi fundida em um forno de arco elétrico. Por meio destes dois métodos de fabricação citados é possível obter formas paralelas, cunhas, arcos, radiais ou outras peças especiais.

Responsáveis por aproximadamente 55 % do consumo dos materiais refratários, os tijolos apresentam as seguintes vantagens:

- Alta resistência ao calor (temperaturas elevadas) e ao impacto;
- Resistência a álcalis e ácidos;
- Encontram-se pré-queimados e pronto para uso;
- Não necessitam nenhuma secagem especial.

Em contrapartida às diversas vantagens encontradas, os materiais refratários formados também possuem suas desvantagens, são elas:

- Maior tempo de instalação;
- Maior quantidade de juntas no revestimento;
- Requerem mão de obra experiente e habilitada;
- Nem sempre estão disponíveis para pronta entrega.

4.5.1.2.2 Refratários não formados ou monolíticos

Ao contrário dos tijolos que já possuem forma definida e são assentados com argamassas, formando várias camadas separadas por juntas, os refratários monolíticos são aplicados no local em que serão utilizados, sendo normalmente posicionados entre moldes e formas. Geralmente depois de aplicados necessitam ser curados (exceto materiais plásticos) e secados termicamente. Entre os principais refratários monolíticos encontram-se:

- **Argamassas:** São utilizadas no preenchimento das juntas entre os tijolos. São classificadas em pega cerâmica, em que a ligação é feita a quente, e pega química quando são ligados por fosfatos, silicatos, sulfatos, etc.
- **Massas Plásticas:** São materiais refratários moldáveis, fornecidos geralmente em placas ou discos, prontos para serem aplicados por acomodação e socagem com a finalidade de reparos ou construções. Normalmente elas endurecem em temperaturas acima da ambiente.
- **Massa de socar:** São massas que permitem estabilidade volumétrica, resistência à erosão e abrasão. São socados com martelotes de alta pressão, obtendo-se construções de alta densidade e dureza superficial. Elas também endurecem em temperaturas acima da ambiente.
- **Concretos:** Na família dos refratários monolíticos, o concreto refratário abrange a maior quantidade de materiais que tem evoluído e crescido significativamente nos últimos 30 anos. Concretos são materiais em pó, distribuídos em granulometrias controladas de agregados, matriz (partículas finas), ligantes refratários e aditivos especiais. Podem ser aplicados e instalados por moldagem com ou sem vibração, projeção a seco, bombeamento e projeção a úmido (shotcrete). Os tipos mais importantes de refratários encontram-se nas famílias de refratários densos e isolantes. Quanto ao tipo de ligação, os concretos podem ser ligados quimicamente, quando possuem ligante químico, ou ligados hidraulicamente, quando contém o cimento de aluminato de cálcio na mistura. Também existem sistemas ligantes mais recentes a base de sílica coloidal, alumina coloidal e ρ -alumina (alumina hidratável). No caso da ligação hidráulica, os concretos são ainda classificados de acordo com a quantidade de cimento contidos na mistura, subdividindo-se nas seguintes categorias:
 - Concretos com alto teor de cimento, também chamados de concretos convencionais ($\% \text{CaO} > 2,5$).
 - Concretos com baixo teor de cimento ($1,0 < \% \text{CaO} < 2,5$).
 - Concretos com ultra baixo teor de cimento ($0,2 < \% \text{CaO} < 1,0$).

- Concreto sem cimento ($\%CaO < 0,2$). Neste caso são adicionados outros agentes ligantes.

4.5.1.2.3 Cura e secagem de materiais refratários

A cura é o período seguinte à instalação (moldagem) do material refratário. Segundo Bernardes [10], a ligação hidráulica formada em concretos convencionais (de pega hidráulica) usualmente, dentro de 24 horas ou menos, provoca reações de hidratação no material. Este fato proporciona ao refratário a resistência mecânica e a resistência à erosão/abrasão a baixa temperatura.

As reações de hidratação ocorridas no período de cura de concreto ligados por cimento de aluminato de cálcio são exotérmicas [13], logo é inevitável o aumento da temperatura do revestimento. Com isso, parte da água adicionada ao concreto, necessária para reação de hidratação, evapora. Para evitar perda da resistência mecânica do refratário, torna-se necessário, durante o tempo de cura, a aspersão de água ou outra forma de umedecimento do refratário. Outra prática utilizada é a aplicação de um selante sobre a superfície refratária para impedir a evaporação de água.

A secagem, também chamada de cura térmica, assegura a resistência mecânica em alta temperatura. Para que isto ocorra, a curva de secagem deve ser realizada em patamares que garantam a correta remoção de água existente. Este procedimento evitará danos por explosões devido à evaporação brusca da água na fase de aquecimento em operação e, desta maneira, é de extrema importância a realização da secagem antes do equipamento entrar em operação, pois, com isto, será atingida a resistência mecânica adequada na temperatura de operação de maneira controlada.

Bernardes [10] classifica a secagem de concretos ligados com cimento de aluminato de cálcio em três fases. Na primeira com aquecimento até 600 °C ocorre a diminuição da resistência do concreto refratário, devido à desidratação, pois há formação de fases com menor resistência. Já na segunda fase, de 600 a aproximadamente 1000 °C, ocorre o aumento da

resistência mecânica, provocando a coesão das partículas adjacentes, usualmente por sinterização, devido à formação de ligações cerâmicas, com a formação de fase vítrea na rede cristalina. A terceira fase ocorre acima de 1000 °C, e, nesta faixa de temperatura, a resistência mecânica volta a diminuir devido à formação de fases líquidas que contém CaO em altas temperaturas.

A secagem pode ser feita por meio de queimadores externos, instalados nos bocais dos equipamentos ou durante o processo de partida, utilizando o próprio sistema de aquecimento do equipamento (exemplo: fornos). No caso dos cadinhos de transferência de alumínio líquido das cubas eletrolíticas para os fornos de espera da empresa parceira, o sistema de aquecimento consiste de um queimador a gás, provido dos devidos sistemas de controle instalados em uma tampa móvel, que é colocada sobre o cadinho no momento da secagem do refratário.

4.5.1.3 Classificação quanto à condutividade térmica

A condutividade térmica de um material refratário indica a sua habilidade para conduzir calor da face quente para a face fria, quando exposto a alta temperatura. Quanto menor for a condutividade térmica, usualmente menor será a densidade, maior será a porosidade e mais isolante será o material. Neste contexto Bernardes [10] classifica os materiais refratários da seguinte maneira:

- Concretos densos com densidade $> 2300 \text{ kg/m}^3$
 - Condutividade térmica de 1,0 a 4,0 W/mK.

- Concretos semi-isolantes com densidade de 1400 a 1700 kg/m^3
 - Condutividade térmica de 0,3 a 0,9 W/mK.

- Concretos isolantes com densidade de 500 a 1300 kg/m^3
 - Condutividade térmica de 0,1 a 0,3 W/mK.

4.5.2 Propriedades dos materiais refratários

Uma vez classificados os materiais refratários, é importante entender melhor a importância de suas propriedades.

Para que sejam atendidos os critérios de seleção de materiais devem ser conhecidas as propriedades necessárias para cada tipo de aplicação, pois elas influenciarão profundamente a vida útil do refratário.

Em muitos casos as propriedades dos refratários podem ser previstas por testes apropriados ou por conhecimento/experiência prévia, quando testes correlacionando as propriedades não estiverem disponíveis. Schacht [13] destaca a importância da realização de testes prévios, pois, segundo ele, os resultados obtidos geralmente encontram-se bem próximos das propriedades características necessárias para cada aplicação pretendida.

Embora a temperatura do alumínio e o processo de ligas sejam bem menores que a do aço, observa-se um problema único de penetração de alumínio no refratário. Logo, o refratário deverá ser concebido de modo que ele tenha características não molhantes para o alumínio líquido. Baseado neste contexto, Schacht [13] e Bernardes [10] classificam as propriedades dos materiais refratários em físicas, químicas, térmicas e mecânicas.

4.5.2.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas que caracterizam os materiais refratários, indicando o uso e os respectivos desempenhos são:

- **Densidade e Porosidade:** seus valores de densidade são utilizados para recomendar ou prever o uso específico de cada refratário.
- **Resistência a frio:** indica o quanto é resistente o refratário para manuseio e instalação.
- **Resistência a quente:** indica qual será o desempenho do refratário quando usado a elevadas temperaturas.

- **Resistência à abrasão:** mede a resistência da força de ligação das partículas refratárias em relação ao fluxo de outras partículas de alta velocidade em toda a sua superfície.

4.5.2.2 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas de um material expressam a sua resposta a um estímulo térmico, seja ele de aumento ou redução de temperatura. As propriedades classificadas e caracterizadas, decorrente da mudança de temperatura, são:

- **Expansão térmica:** É a tendência do material para a mudança de volume, em resposta à exposição de diferentes intervalos de temperaturas elevadas e, em seguida, resfriado à temperatura ambiente.
- **Resistência ao Choque térmico:** É a medida da propriedade quando o refratário é exposto a alternados processos de aquecimento e resfriamento
- **Condutividade térmica:** É a medida da capacidade do refratário, quanto exposto a altas temperaturas, para conduzir calor da face quente para a fria. Indica a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão.
- **Difusividade térmica:** É uma propriedade que expressa a rapidez que um corpo se ajusta por inteiro à temperatura de seu entorno. A difusividade pode ser medida, no entanto é facilmente calculada dividindo-se o valor da condutividade térmica pelo calor específico volumétrico.

4.5.2.3 Propriedades químicas

As propriedades químicas dos refratários são definidas por meio de

análises químicas do pó moído do refratário, pela natureza da ligação e habilidade dos refratários resistirem à ação de agentes químicos, que podem ser líquidos ou gases, quando expostos a altas temperaturas. As propriedades químicas dos refratários são ditadas principalmente pela composição química do material.

Na maioria dos casos a dissolução no contato com o líquido, um vapor-líquido ou reações de fase sólida seguidas ou não de penetração de vapor ou líquido nos poros, pode causar corrosão e/ou desgaste no refratário. Neste contexto a resistência à corrosão/desgaste é uma das características mais importantes dos refratários que são expostos ao metal líquido e escória. Sendo assim, durante a formulação do refratário, atenção especial deve ser dada para:

- Composição do refratário;
- Escolha dos grãos do refratário (agregados);
- Seleção das partículas finas (matriz);
- Sistema ligante.

4.5.2.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas compreendem a resposta dos materiais às influências mecânicas externas, manifestadas pela capacidade de resultarem em deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura. Devido à existência de planos de deslizamento independentes, ligações iônicas e/ou covalentes e ordem a longa distância, os materiais cerâmicos são duros e frágeis com pouca tenacidade e ductilidade, sendo a ruptura o mecanismo mais comum para a maioria dos materiais cerâmicos. No entanto, as ligações interatômicas fortes dos materiais cerâmicos garantem, simultaneamente, dureza e refratariedade.

Sendo geralmente não dúcteis, os materiais cerâmicos apresentam características de resistência mecânica bastante distinta da dos metais. Não

sendo dúctil o material cerâmico é muito resistente à compressão, pois, ele não se rompe por deslizamento, e, portanto, o comportamento à compressão está diretamente relacionado às forças interatômicas. Um cálculo baseado exclusivamente nas forças interatômicas indicaria que a resistência mecânica seria da ordem de 10% do módulo de elasticidade. Na prática, os produtos cerâmicos comerciais têm resistência à tração de somente 1% desse valor.

Entre as propriedades mecânicas mais comuns que se mede nos materiais cerâmicos, estão:

- Resistência à compressão uniaxial a temperatura ambiente (RCTA);
- Resistência à flexão em 3 pontos a alta temperatura (MOR)
- Resistência ao choque térmico e a refratariedade sob carga.

4.5.3 Refratários utilizados na indústria do alumínio

Na indústria do alumínio, desde a obtenção de alumina por meio do processo Bayer até a geração do alumínio pelo processo Hall-Heroult, vários tipos de refratários com propriedades e composições químico-mineralógicas distintas são utilizadas.

Nos calcinadores e leitos fluidizados, por exemplo, a propriedade fundamental de desempenho do refratário é a sua resistência à erosão [15]. Já nos fornos de cozimento de anodo o refratário tem que resistir ao ataque químico (alcalis, fluor, enxofre, óxido de ferro e monóxido de carbono), enquanto que nas cubas eletrolíticas a função mais importante dos refratários das camadas inferiores é proteger o revestimento isolante da cuba da intrusão progressiva de banho criolítico ao longo do tempo [16].

Na sequência do processo produtivo do alumínio, devido às severas condições que são expostas ao longo do tempo, os refratários de diversos equipamentos, dentre eles fornos de espera e de fusão, assim como os cadinhos, estão sujeitos a vários tipos de degradação quando expostos ao contato com o alumínio. Estas degradações são divididas e classificadas da

seguinte forma [17]:

- **Degradação química:** gerada pela reatividade entre o refratário, metal e elementos de liga (geralmente alteram a viscosidade do alumínio), o banho criolítico, atmosfera e os agentes fluxantes.
- **Degradação mecânica:** causada pelas tensões externas impostas ao revestimento durante a limpeza do refratário para retirada de incrustações, carregamento e descarregamento de metal, içamento do cadinho e a erosão decorrente da própria velocidade do metal.
- **Degradação física:** isto ocorre devido às variações volumétricas causadas por choques térmicos, transformações de fase e reações químicas, causando tensões internas ao revestimento.

As degradações físicas e químicas são agravadas quando ocorre penetração da atmosfera ambiente, do banho criolítico, dos fluxos e do próprio metal pela porosidade, trincas e juntas existentes na estrutura do revestimento refratário, podendo provocar desde a perda de propriedades do revestimento até a desintegração do refratário e formação de inclusões refratárias [17]. Nota-se, então, que diferentes variáveis estão relacionadas diretamente com a vida útil do equipamento. Desta maneira justifica-se a discussão destas nos próximos tópicos.

4.5.3.1 Refratários utilizados em cadinhos

A especificação de um refratário de cadinho tem grande efeito em suas propriedades térmicas, pois o desempenho pode ser otimizado pelo adequado isolamento. No entanto, para se obter um melhor isolamento, é necessário aumentar a porosidade, tendo como consequência um maior contato de alumínio e menor resistência ao processo de limpeza. Para contrabalancear estas desvantagens torna-se necessário o uso de um refratário denso para dificultar a penetração de alumínio líquido e, ao mesmo tempo, resistir às solicitações de limpeza. Entretanto esta classe de refratário, além de exibir uma

baixa resistência ao choque térmico, apresenta maior condutividade térmica. Assim, um equilíbrio entre as propriedades do revestimento refratário e as necessidades operacionais é fundamental, justificando então a necessidade de uma abordagem sistêmica para a correta seleção de materiais.

4.6 Análise sistêmica sobre materiais refratários para cadinhos

De acordo com Beelen [1], devido aos ciclos de carregamento e descarregamento de metal, os principais mecanismos de desgaste dos refratários em contato com o alumínio estão correlacionados com o ataque químico, o impacto durante a limpeza e o choque térmico. Desta maneira nota-se a necessidade da avaliação termodinâmica e dos fatores cinéticos dos mecanismos físico-químicos de desgaste.

Outra avaliação necessária é referente aos aspectos microestruturais do refratário, pois o tamanho de grão, porosidade e a distribuição de tamanho de poro, são fatores determinantes no comportamento do processo de degradação físico-química do refratário.

4.6.1 Considerações termodinâmicas

A termodinâmica dos sólidos é de grande auxílio na engenharia de materiais para se prever a estabilidade e o estado de um material em determinadas condições de temperatura e pressão. Ela permite efetuar uma avaliação da tendência dos óxidos componentes dos refratários a reagir com o alumínio [18]. Pela termodinâmica, as reações podem ocorrer espontaneamente, desde que seus produtos sejam mais estáveis que os reagentes iniciais. Para se alcançar a estabilidade ou estado de equilíbrio termodinâmico, o sistema deve atingir seu menor estado de energia. Esta estabilidade é mensurada pela energia livre de Gibbs (G). Por meio dela, é

possível avaliar o nível de estabilidade de um óxido em relação ao alumínio, ou seja, quanto mais negativo for o valor de G, mais estável o óxido e menor a tendência do alumínio reduzi-lo [18].

De acordo com Siljan [17], a deterioração do revestimento refratário em fornos de espera e fusão é governada pelas propriedades do metal fundido, juntamente com as propriedades do material refratário e pela mineralogia dos produtos de reação. Desta maneira, o melhor caminho para descrever estes fatores é pelo uso da termodinâmica, assim como a reação química entre o alumínio fundido e o óxido componente do refratário ser expressa pela equação 4.6 [17]:



Em que M_yO_x é um óxido metálico e M um elemento metálico.

Considerando a equação 4.6, juntamente com dados termodinâmicos, é possível efetuar uma diagramação da estabilidade dos refratários frente ao ataque pelo alumínio. A seguir, Siljan [17] e Bráulio [18] mostram, respectivamente, por meio da Tabela 4.2 e da Figura 4.4 a chamada “Série eletroquímica/eletromotiva dos metais”, em que cada metal reduz qualquer óxido abaixo dele:

Tabela 4.2 Série eletromotiva ou eletroquímica de alguns metais a 1300 °K [17].

Metal	Óxido	Energia livre por mol de oxigênio (ΔG)
Y	Y_2O_3	- 510 kJ/mol
Ca	CaO	- 499 kJ/mol
Mg	MgO	- 458 kJ/mol
Zr	ZrO_2	- 428 kJ/mol
Ba	BaO	- 424 kJ/mol
Al	Al_2O_3	- 420 kJ/mol
Ti	TiO_2	- 354 kJ/mol
Si	SiO_2	- 335 kJ/mol
Mn	MnO	- 298 kJ/mol
Cr	Cr_2O_3	- 264 kJ/mol
Na	Na_2O	- 236 kJ/mol (estimado)
Zn	ZnO	- 205 kJ/mol
P	P_2O_5	- 178 kJ/mol (estimado)
Fe	Fe_2O_3	- 162 kJ/mol

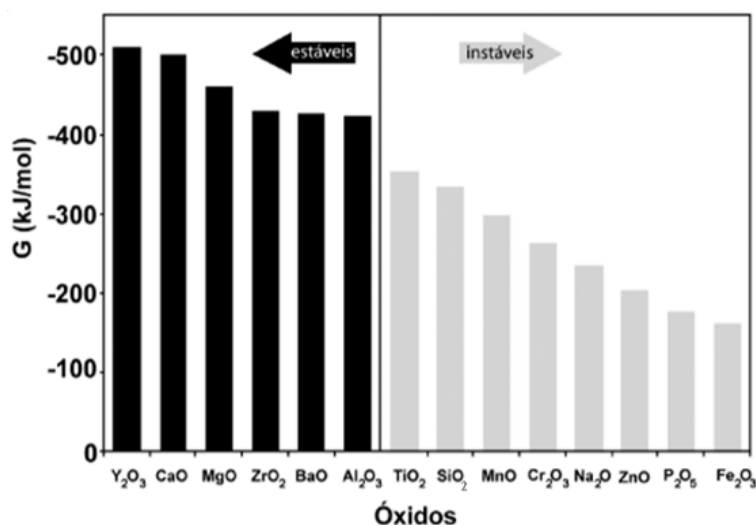


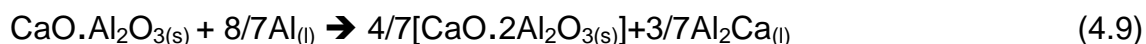
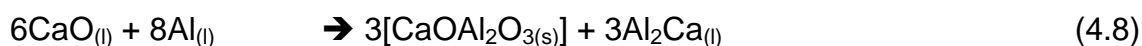
Figura 4.4 Gráfico da série eletroquímica de estabilidade dos óxidos frente ao alumínio a 1300° K [18].

Como pode ser visto na Tabela 4.1 óxidos frequentemente presentes em refratários, tais como SiO₂, TiO₂, Na₂O e o Fe₂O₃, são reduzidos ao entrarem em contato com o alumínio, por serem menos estáveis termodinamicamente. Ao mesmo tempo, analisando os valores de energia livre, pode-se verificar que o óxido de ítrio, por apresentar menor valor de energia livre de formação, oferece a melhor solução termodinâmica, pois é o mais estável. Em contrapartida, esta alternativa é economicamente inviável, uma vez que há escassez de ítria na natureza.

Com características de alta refratariedade e baixo custo, a magnésia é um óxido interessante que poderia ser usado como revestimento. No entanto Siljan [17] alerta que, em contato com a alumina, o magnésio que é elemento de liga do metal leva à formação de espinélio, conforme pode ser observado na equação 4.7. Esta reação causa à expansão de volume no refratário em torno de 17%, tendo como consequência a formação de trincas, promovendo o aumento de penetração de metal [17], caso não seja controlada. O magnésio também reduz a viscosidade do alumínio, aumentando a suscetibilidade à infiltração [18].



Aparentemente um óxido que poderia ser viável é a cálcia. Porém, segundo os estudos de Siljan [17] o óxido de cálcio, além de sofrer reações de hidratação com facilidade, pode reagir com o alumínio líquido a 800° C e formar um óxido e uma fase intermediária conforme equações 4.8 e 4.9:



Um outro óxido que poderia ser utilizado é o óxido de bário, mas não se encontram relatos na literatura sobre seu uso para aplicação em refratários com contato com alumínio. Porém, são encontrados alguns aditivos, utilizados em revestimento em contato com alumínio líquido, que contêm bário em sua composição química. Nos tópicos posteriores serão discutidas as características desses compostos.

Percebe-se, até o momento, a existência de várias alternativas inviáveis baseadas apenas nos aspectos termodinâmicos para definir o melhor revestimento refratário para contato com alumínio líquido. Entretanto, nota-se um extenso uso de materiais sílico-aluminosos, principalmente em cadinhos de transporte de alumínio. Esse aspecto acaba sendo um paradoxo, pois, segundo Siljan [17,19], a sílica livre e seus compostos mineralógicos e estequiométricos, tais como a mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e a cordierita ($\text{Al}_4\text{Mg}_2\text{Si}_5\text{O}_{18}$), apesar de serem benéficos na redução de porosidade pela formação de fase líquida, limitam a temperatura de aplicação do refratário e são materiais altamente suscetíveis a corrosão pelo alumínio líquido, conforme as equações 4.10, 4.11 e 4.12, mostradas a seguir:



$$\Delta G_{1200\text{K}} = -503,1 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G_{1200\text{K}} = -965,3 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G_{1200\text{K}} = -2330,8 \text{ kJ/mol}$$

De acordo com estes aspectos é evidente que a termodinâmica sozinha não é suficiente para definir se a degradação ocorrerá ou não. Desta maneira surge a necessidade de uma melhor compreensão da cinética da reação entre o alumínio e os refratários, assim como dos aspectos microestruturais envolvidos.

4.6.2 Considerações cinéticas

A temperatura, a concentração dos reagentes e a superfície de contato afeta diretamente a cinética de degradação dos refratários.

Segundo Siljan [17] o aumento de temperatura favorece a degradação, levando a reações mais agressivas à medida que aumenta o grau de agitação do meio. Siljan [17] também destaca que referente à concentração dos reagentes, as fases amorfas presentes no refratário, os elementos redutores no metal, e as impurezas provenientes de ambos são os reagentes mais preocupantes, pois, são os que apresentam maior reatividade.

É importante ressaltar que o aumento da superfície de contato entre os reagentes também acelera a degradação do refratário, sendo a matriz do refratário a região que se deteriora mais rapidamente [17]. No entanto, para todos os casos a degradação só ocorrerá se o alumínio fundido molhar o refratário [17, 18, 19].

Segundo Kingery [20], o equilíbrio de configuração de uma gota de um líquido sobre uma superfície sólida, o molhamento e as propriedades de fluxo são determinados pelas energias de fase e interface nos sistemas formados pela combinação entre sólido, líquido e vapor. De acordo com Rahaman [21], a molhabilidade de um sólido terá a tendência de ocorrer se, em nível molecular, a coesão entre as moléculas de um líquido for menor que a adesão entre o líquido e o sólido. Sendo assim, o molhamento ocorre quando o ângulo de contato metal-refratário (θ) torna-se inferior a 90° como ilustra a Figura 4.5. Neste caso, o líquido penetra por capilaridade para o interior dos poros, deixando a superfície do refratário exposta ao fenômeno de erosão/corrosão

muito mais intensa.

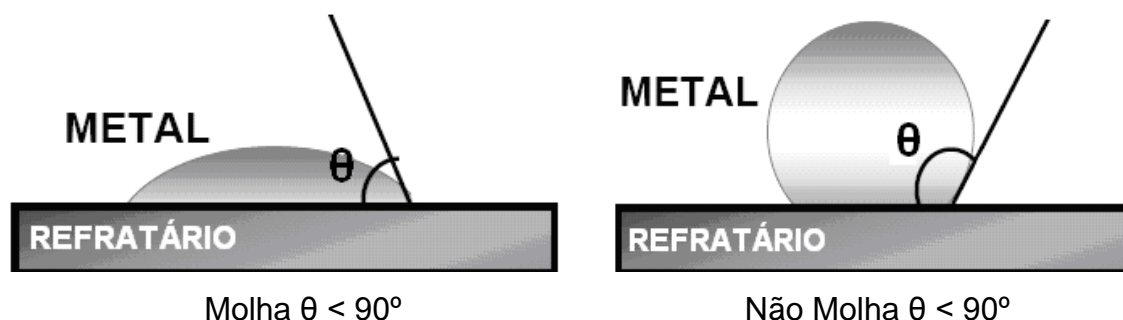


Figura 4.5 Comportamento do ângulo de contato entre metal e refratário

O ângulo de molhamento é obtido traçando-se uma reta tangente imaginária à gota do líquido a partir do ponto de contato da superfície do sólido com a superfície do líquido. Neste momento, forma-se um ângulo com o plano horizontal do substrato denominado ângulo de molhamento.

Siljan [17,19] destaca que fatores externos, como temperatura, a formação de camada de óxido sobre o metal e o aumento do tempo de exposição podem alterar os valores do ângulo de contato.

No caso do aumento da temperatura, entre 900 °C e 1000 °C, há uma redução repentina do ângulo de contato, favorecendo a molhabilidade. Isto ocorre devido à reação entre o alumínio líquido e a alumina do refratário formando uma espécie gasosa de Al_2O . Desta forma fica claro que o alumínio, além de molhar nítretos, boretos e carbetos, molha também seu próprio óxido, principalmente a altas temperaturas [19].

A maior dificuldade de medição do ângulo de molhamento do alumínio é devido à alta afinidade deste metal com o oxigênio. Portanto, há grande dificuldade de obter uma camada de superfície de alumínio livre de oxigênio e é inevitável a presença de um filme de oxigênio que influenciará fortemente nas medições, pois será inibida a verdadeira interface alumínio-refratário e alumínio-ar. Logo, quanto mais espessa a camada de óxido maior será o ângulo de contato e menor a molhabilidade. Em seus ensaios, Siljan [19] observou que em baixas pressões (no vácuo) e à temperatura de 800 °C, ocorre ruptura do filme passivador, tendo como consequência o aumento

da molhabilidade.

Outro fator externo, observado por Siljan [19], na temperatura de 700 °C (no vácuo) é o fenômeno da molhabilidade reativa, que ocorre quando há aumento do tempo de exposição do refratário ao alumínio líquido, levando, com isto, à redução do ângulo de contato.

Diante do apresentado anteriormente, deve-se evitar ou reduzir o molhamento de uma maneira direta e eficaz. Uma das possibilidades de melhoria da resistência química dos óxidos refratários é adicionar a suas composições químicas aditivos denominados agentes anti-molhantes.

4.6.2.1 Agentes anti-molhantes

Agentes anti-molhantes são aditivos que uma vez incorporados à composição química do refratário possuem propriedades físico-químicas capazes de reduzirem o molhamento do refratário pelo metal.

A necessidade do uso destes aditivos se torna ainda mais evidente quando se observa o intenso uso de refratários silico-aluminosos em contato com o alumínio. Esta preocupação, conforme já mencionado na seção anterior, se faz presente devido ao fato da sílica livre e seus compostos mineralógicos e estequiométricos como a mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) e cordierita ($\text{Al}_4\text{Mg}_2\text{Si}_5\text{O}_{18}$) serem materiais altamente suscetíveis a corrosão pelo alumínio líquido. Sendo assim, o uso de agentes anti-molhante, como BaSO_4 , AlF_3 e CaF_2 [14], tem a função de retardar ou prevenir a reação direta entre a sílica e o alumínio, conferindo aos refratários silico-aluminosos um custo relativamente baixo, aliado a disponibilidade e boas propriedades térmicas em seus respectivos regimes de trabalho.

Apesar da grande promessa de benefícios com o uso dos aditivos anti-molhantes, seus efeitos ainda são obscuros e nenhuma conclusão clara pode ser feita. Contudo, Siljan [17] reporta em seu trabalho que melhorias foram notadas em amostras em que estes aditivos foram utilizados, porém eles perdem seus efeitos a temperaturas entre 900 °C e 1100 °C, o que não chega a

ser preocupante no caso dos cadinhos onde as temperaturas de trabalho são relativamente menores.

Mesmo sendo questionáveis seus benefícios, o efeito de tais aditivos parece ser benéfico em muitos casos, logo o seu estudo torna-se motivador para este trabalho.

Na busca pelo melhor material para contato com o alumínio, muitas vezes a solução química ideal é difícil e onerosa, sendo assim, para retardar a infiltração de alumínio líquido, torna-se essencial a análise dos aspectos microestruturais envolvidos.

4.6.3 Aspectos microestruturais

Considerando que os materiais refratários são constituídos de agregados refratários e agentes ligantes, verifica-se que durante a sua produção, tais materiais de ligação, juntamente com frações finas de agregados refratários, constituem o que geralmente é chamada de microestrutura [19].

Os principais parâmetros segundo os quais uma microestrutura cerâmica pode ser definida são [19, 21]:

- Distribuição, tamanho e formato dos grãos;
- Porosidade;
- Distribuição de tamanhos de poros;
- Composição química da matriz e agregados;
- Distribuição e concentração de fases vítreas e cristalinas.

Desta maneira a microestrutura é totalmente dependente do método de fabricação, desde a seleção e preparação das matérias-primas até as etapas de conformação/instalação, cura e queima [21], conforme pode ser observado na Figura 4.6.

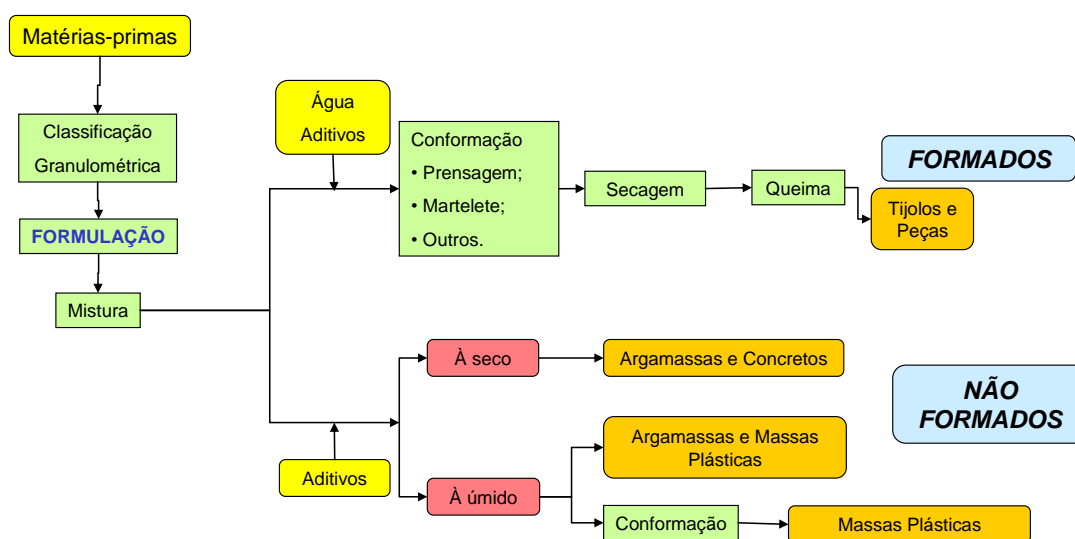


Figura 4.6 Processo de fabricação dos materiais refratários

Portanto, falhas microestruturais podem limitar as propriedades do corpo fabricado. Neste contexto, Siljan [19] e Rahaman [21] fazem vários alertas para o processo de fabricação dos materiais cerâmicos, são eles:

- **Granulometria:** Pode ser alterada por processos de moagem, separação granulométrica e mistura, e tem influência direta sobre a densidade do empacotamento, seu controle permite obter propriedades otimizadas como densidade, porosidade aberta e distribuição de tamanho de poro. Atenção especial deve ser dada ao tamanho da partícula, pois a taxa de sinterização de um corpo aumenta fortemente com a diminuição do tamanho das partículas.
- **Impurezas:** Contaminantes no agregado tendem a acumular em frações finas, podendo a composição química da matriz diferir substancialmente da composição química global do refratário. As impurezas podem também levar à presença de uma pequena quantidade de fase líquida na queima do material, a qual pode causar crescimento de grãos, tornando impossível a uniformidade da microestrutura.
- **Aglomerados:** Levam ao empacotamento heterogêneo no corpo verde, causando gradientes de densificação durante a queima, provocando

consequentemente o desenvolvimento de poros grandes e imperfeições no corpo queimado.

- **Conformação/instalação:** Influencia diretamente o empacotamento do material e sua homogeneidade em relação ao estado de empacotamento. Logo, cuidados extras devem ser tomados para a instalação de concretos e massas de socar. O procedimento de instalação e a qualificação dos instaladores são imprescindíveis para a obtenção das propriedades desejadas. Falhas decorrentes de instalação afetarão a microestrutura do material refratário e diminuirão sua resistência à penetração de alumínio no revestimento.
- **Empacotamento:** A densidade do empacotamento aumenta de acordo com o desvio padrão da distribuição granulométrica, alcançando altos valores de densificação para distribuição larga de tamanho de partículas. Cuidados especiais devem ser tomados para distribuição estreita de tamanhos de partículas, pois haverá dificuldade de densificação durante a queima devido à maior tendência de sua aglomeração.
- **Fases vítreas:** Em excesso, causarão menor resistência à penetração e a reação com o metal, bem como reduzirão a refratariedade do sistema. Isto ocorrerá, principalmente, se permanecer líquida durante a utilização do refratário.
- **Queima do material:** Deverá ser superior a temperatura de trabalho. O controle deficiente de temperatura e tempo, taxas e atmosfera de aquecimento causam danos irreversíveis ao refratário, afetam a densidade e o tamanho de grão do material, alterando também sua resistência mecânica e ao choque térmico. Taxas de aquecimento iniciais elevadas podem levar a água e outras espécies voláteis a saírem de forma abrupta do corpo, causando trincas e algumas vezes desprendimento (explosão) do material aplicado. Altas temperaturas finais de queima, além de tornar os poros maiores, tendem a aumentar a quantidade de fase vítrea em materiais silico-aluminosos, tornando-os mais vulneráveis à penetração de alumínio líquido no revestimento.

Uma vez queimado, o refratário está pronto para uso, pois sua energia superficial foi minimizada e sua porosidade total foi diminuída sensivelmente. Apesar de ter tido a porosidade total reduzida durante a queima, o refratário não necessariamente terá a sua resistência à penetração do metal aumentada, pois não é a porosidade e sim a distribuição de tamanho de poro que define a facilidade e também a permeabilidade de infiltração do metal pelo corpo do material refratário.

De acordo com Bráulio [18], a profundidade de infiltração do metal por meio dos poros aumentará em função do tempo de exposição do metal, decorrente da redução do ângulo de contato entre o metal e o refratário e do aumento da pressão capilar dos poros do refratário. Esta afirmação pode ser comprovada por meio da equação 4.14, em que Siljan [16], a partir da integração da Lei de Poiseuilles e do uso da definição de Lee e Zhang para pressão hidrostática, equaciona o exposto anteriormente:

$$l = \sqrt{(d\gamma \cos\theta)t / 4\eta} \quad (4.14)$$

em que:

l = profundidade da penetração

d = diâmetro do poro

γ = tensão superficial do alumínio líquido

θ = ângulo de contato entre o metal e o refratário

t = tempo

η = viscosidade do metal

Sendo assim, com auxílio da equação 4.14, dada a alta fluidez da maioria das ligas de alumínio, pode-se verificar que é possível controlar e ou retardar a penetração de alumínio por meio da redução do tamanho médio de poros, diminuindo assim a área de contato entre o alumínio e o refratário. Contudo, Bráulio [18] alerta que em um segundo estágio, a partir de certo valor de pressão crítica, a taxa de infiltração aumenta rapidamente, tornando-se também necessário o controle químico por meio da aplicação de agentes

anti-molhantes para reduzir a queda do ângulo de molhamento ao longo do tempo.

Neste contexto, Siljan [19] define e classifica três tipos de condições que determinam o grau de penetração conforme Figura 4.7:

- **Porosidade fechada:** corresponde a 10% da porosidade total do refratário. Pode-se concluir que este tipo de porosidade não terá nenhum efeito sobre a penetração do alumínio ou taxas de penetração, pois os poros encontram-se fechados.
- **Porosidade aberta não conectada:** este tipo de porosidade se encontra na superfície do refratário, seu preenchimento por metal é governado pelo equilíbrio da pressão hidrostática do alumínio e a pressão constituída pela atmosfera comprimida dentro dos poros.
- **Porosidade aberta interconectada:** é a porosidade que atravessa toda a espessura do revestimento refratário. Seu preenchimento completo de alumínio líquido e a taxa de penetração dependerão das propriedades físicas do material e da estrutura dos poros. Este tipo de porosidade é responsável por uma importante propriedade microestrutural que é a permeabilidade.

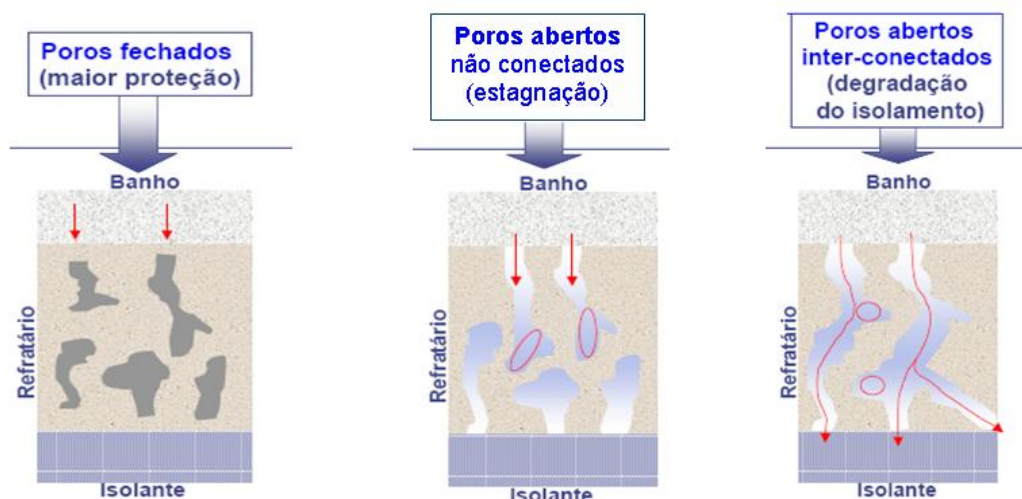


Figura 4.7 Grau de penetração do alumínio pelo refratário

A permeabilidade é caracterizada quando um fluido é forçado a atravessar um meio poroso. A complexa interação existente entre o fluido e o

canal poroso ocasiona uma mudança na energia do sistema, gerando uma queda de pressão exercida pelo fluido [22]. Logo a permeabilidade é uma interação dinâmica entre o meio poroso e o fluido.

A degradação física e química é agravada quando ocorre penetração da atmosfera ambiente, do banho, dos fluxos e do próprio metal pela porosidade, trincas e juntas existentes na estrutura do revestimento refratário, podendo provocar desde a perda de propriedades do revestimento até a desintegração do refratário e formação de inclusões refratárias [17].

Nota-se então que diferentes variáveis estão relacionadas diretamente com a vida útil do equipamento, principalmente o revestimento refratário.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é composto de duas etapas de melhorias. Na primeira etapa focamos no entendimento do processo como um todo, para em seguida dedicarmos-nos nas oportunidades relativas à manutenção e aplicação do refratário e do seu sistema de pré-aquecimento. Somente após implantação das melhorias detectadas na primeira etapa do trabalho, foi possível estabelecer uma referência para comparações futuras e iniciar uma segunda etapa de trabalho que visasse definir testes, valores e características do refratário mais adequados.

5.1 Primeira etapa

Para que houvesse sucesso neste trabalho buscou-se uma boa sintonia e benefícios mútuos entre a empresa parceira da pesquisa e o meio acadêmico. Somente desta maneira a contribuição tecnológica deste trabalho ganhou o enfoque necessário para continuidade desta pesquisa. Logo a solução do problema na linha de produção da empresa parceira, a partir do método científico, trouxe enormes contribuições não somente à Alcoa, mas também aos modelos de interação universidade-empresa.

Neste contexto foram consideradas duas fontes de informação. A primeira foi a teoria obtida na literatura. A segunda fonte de informação foi os resultados práticos na empresa parceira, os quais serão utilizados para previsões teóricas e simulações, assim como referenciais para comparativos futuros.

Objetivando o conhecimento do processo como um todo e visando otimização de tempo, energia e prevenção de falhas, a coleta das informações industriais foi realizada de maneira sistêmica. Ela começou com o conhecimento do atual projeto e das fichas técnicas dos materiais utilizados. Em seguida, para o entendimento do processo de limpeza, da

aplicação/manutenção e pré-aquecimento do refratário, foram utilizados os seguintes recursos:

- Procedimentos operacionais existentes;
- Relatórios operacionais e de manutenção;
- Observações de campo;
- Entrevistas e reuniões com equipe operacional e de manutenção.

5.1.1 Metodologia para abordagem dos problemas existentes

5.1.1.1 Processo de limpeza

Na tarefa de limpeza de cadinho foi verificado e comparado o atual sistema com os demais já utilizados na planta da empresa parceira e de outras unidades do grupo. Foi realizada também uma análise considerando os prós e contras de cada sistema

5.1.1.2 Aplicação / Manutenção do refratário

As observações efetuadas nas tarefas de aplicação/manutenção do refratário tiveram como objetivo verificar:

- Se o procedimento de preparação e aplicação dos materiais refratários estava de acordo com as recomendações do fabricante.
- A existência de uma correta homogeneização, dosagem, mistura e temperatura da água, assim como do controle do tempo de mistura.
- A capacitação técnica dos aplicadores de material refratário.
- Se havia planejamento e preparação do serviço com antecedência, independentemente da quantidade de material a ser aplicado.

- Tipo de manutenção utilizada (corretiva, preventiva ou preditiva)
- Procedimento de armazenagem do material.
- Testes de recebimento do material.

5.1.1.3 Pré-aquecimento do refratário

O pré-aquecimento, secagem ou cura térmica objetiva assegurar resistência mecânica em alta temperatura. Conforme mencionado, para que isto ocorra a curva de secagem deve ser realizada visando assegurar a correta remoção de água existente.

De acordo com Akiyoshi [23], a secagem é uma das etapas mais complexas do processamento dos materiais refratários, pois além de envolver gastos com energia e tempo de parada de equipamentos, pode, quando não realizada de forma correta, provocar graves acidentes, incluindo explosões. Geralmente estas explosões são decorrentes da evaporação brusca da água existente na fase de aquecimento em operação. Por este motivo, é de extrema importância a realização da secagem segundo as orientações do fabricante, antes do equipamento entrar em operação, pois, com isto, será atingida a resistência mecânica adequada na temperatura de operação.

Neste contexto, foi observada a confiabilidade do atual sistema, comparando o tratamento térmico efetuado pelo pré-aquecedor com a curva de aquecimento fornecida pelo fabricante do refratário.

Foi também efetuado um estudo comparativo de custo/benefício baseado nos prós e contras de um sistema de pré-aquecimento a gás e um elétrico.

5.1.2 Procedimentos de inspeção da vida útil do refratário

Com o intuito de monitorar e acompanhar o desempenho dos revestimentos refratários dos cadinhos foram utilizados dois tipos de inspeção:

- **Inspecões termográficas:** foram realizadas externamente ao cadinho por meio do uso de uma câmara de termografia.
- **Análise post mortem:** foram realizadas internamente por meio de inspeção visual com registro fotográfico.

Para realização de ambas as inspeções, foram utilizadas metodologias que determinam critérios que regulamentam a apresentação dos resultados de modo a garantir a continuidade e padronização dos procedimentos. A realização periódica destas inspeções forneceu subsídios para a aplicação de uma visão sistêmica na gestão dos revestimentos refratários dos cadinhos.

5.1.2.1 Inspecões termográficas

Para avaliação da integridade física do revestimento refratário do cadinho sem que haja parada operacional, utilizou-se inspeções termográficas. A inspeção termográfica é uma técnica de manutenção preditiva que é realizada por meio de acompanhamento do parâmetro “temperatura da carcaça metálica do cadinho”.

De acordo com a ABENDI [24], Lafraia [11] e Pelizzari [25], a termografia é uma técnica não destrutiva em que, por meio do espectro infravermelho, obtêm-se imagens térmicas, também chamadas de termogramas, que permitem uma análise quantitativa para determinação e identificação de níveis isotérmicos. Medição esta que é realizada pela detecção da radiação térmica ou infravermelha emitida por qualquer corpo, equipamento ou objeto. Um detector de sistemas infravermelhos (radiômetros, visores térmicos ou termovisores) transforma a energia radiante na faixa do infravermelho em outra forma mensurável de energia, tendo como princípio a comparação entre as intensidades de radiação provenientes do corpo observado e de uma referência de temperatura. Em quaisquer dos sistemas de manutenção considerados, a termografia se apresenta como técnica de inspeção de grande utilidade, uma vez que permite:

- A realização de medições sem contato físico com a instalação (segurança).
- A verificação de equipamentos em pleno funcionamento (sem interferência na produção).
- A inspeção de grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento)

Os programas desenvolvidos para a classificação de componentes elétricos aquecidos, avaliação da espessura de revestimentos refratários e o cálculo de trocas térmicas, permitem que os dados térmicos sejam empregados em análises preventivas e preditivas.

A empresa parceira deste trabalho possui dois equipamentos que são utilizados para a realização destas inspeções. O primeiro é uma câmara termográfica do fabricante Cincinnati, modelo TVS 100/110 (mais antigo) e um equipamento mais moderno e de melhor resolução de imagens (Therm Cam P65 fabricado pela Flir Systems) que é atualmente utilizado nas inspeções.

Com a utilização das inspeções termográficas foi possível o monitoramento da vida útil do refratário por meio da evolução de temperatura da carcaça metálica do cadinho. De acordo com Veratti [26], a relação entre a temperatura externa em uma parede refratária e sua espessura é obtida assumindo-se que o fluxo de calor conduzido por meio da parede é dissipado para o ambiente pelos mecanismos de convecção e radiação. É importante ressaltar que estudos de termografia comprovaram que a perda de temperatura na carcaça metálica é desprezível e não influencia na medição de temperatura do refratário [12, 26].

Neste contexto os valores obtidos na inspeção termográfica convertem-se em uma valiosa fonte de informação para avaliar e decidir quando realizar os reparos necessários de refratários, possibilitando adiar ou antecipar a data de manutenção preventiva, por meio do estabelecimento de valores limites aceitáveis de temperatura de carcaça metálica antes de cada manutenção. Para estabelecer estes limites foram escolhidos, de forma aleatória, três cadinhos com refratários novos para monitoramento termográfico.

5.1.2.1.1 Metodologia de realização da Inspeção

Para garantia de sucesso destas inspeções e para se ter medições confiáveis e padronizadas para comparação dos resultados, os seguintes cuidados foram tomados:

- A equipe que realizou esta tarefa foi treinada e qualificada no uso do equipamento de medição e interpretação dos resultados:
- Verificou-se se os equipamentos encontravam-se com certificação de calibração em validade.
- A distância de medição (aparelho até o cadinho), quantidade e temperatura de metal dentro do cadinho, foram padronizadas em:
 - Distância de medição igual a 3 metros (+- 20 cm)
 - Quantidade de metal dentro do cadinho igual a 6.800 kg (seis mil e oitocentos kilogramas).
 - Temperatura dentro do cadinho igual a 850 °C.
- O sifão da tampa do cadinho foi aberto e o bico do mesmo fechado.
- As inspeções foram focadas nos pontos de A a E, conforme pode ser observado na Figura 5.1.

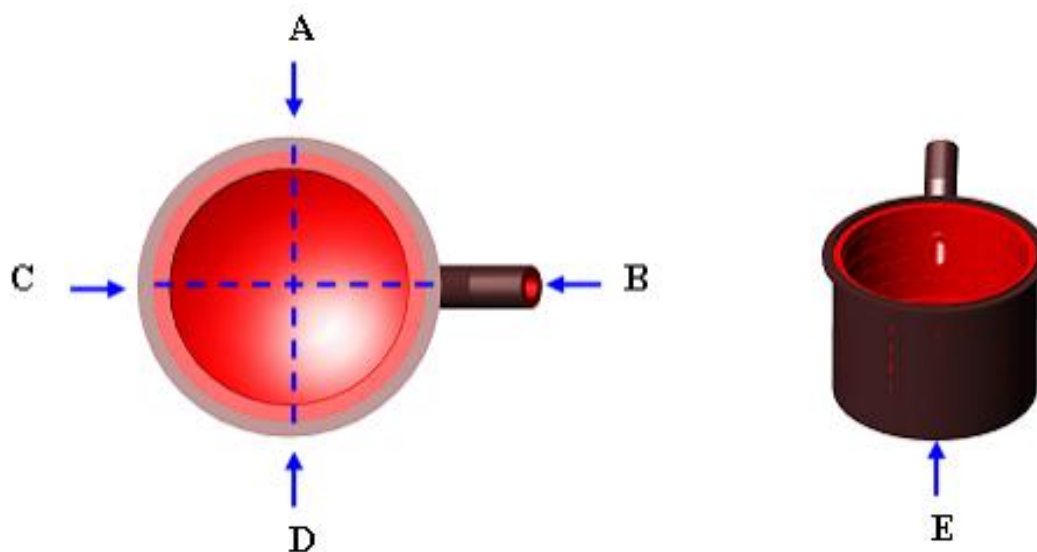


Figura 5.1 Detalhe do posicionamento e pontos do cadinho para inspeção termográfica

Os pontos de A a D se encontraram a 50% da altura das paredes, enquanto o ponto E se encontrava no centro do fundo do cadinho. Visando padronização, todos estes pontos foram marcados em alto relevo em cada cadinho, no mesmo posicionamento, por meio de pontos de solda elétrica. Uma vez realizada a primeira inspeção foi elaborado um procedimento de trabalho que serviu de orientação e padrão para as demais inspeções.

5.1.2.1.2 Relatório da inspeção termográfica

Após cada inspeção foi emitido relatório contendo as seguintes informações:

- Número do cadinho;
- Data;
- Quantidade em quilogramas de metal corrido;
- Emissividade adotada;
- Temperatura ambiente e refletida;
- Humidade relativa;
- Distância de medição;
- Termogramas dos pontos de A a E.

Estas informações constantes no relatório serviram para acompanhamento da evolução térmica da temperatura de carcaça e espessura de refratário do cadinho, assim como fonte de informação para análise post mortem.

5.1.2.2 Análise post mortem (mecanismos de desgaste)

A análise post mortem consistiu em uma inspeção visual do refratário, para verificar quais os mecanismos de desgaste que ainda limitam a sua vida

útil diante das condições de operação e limpeza. A avaliação da taxa de desgaste pode também ajudar na previsibilidade de falha funcional do revestimento, sendo, portanto um dado importante para planejamento de manutenções preventivas.

Com esta técnica foi possível estudar as causas da falha do revestimento, por meio da identificação dos principais mecanismos de desgastes e as principais solicitações às quais estão sujeitos os materiais refratários instalados no cadinho. A partir desta análise foram propostas soluções para aumentar a vida útil do refratário e torná-lo mais resistente às degradações químicas, mecânicas e físicas.

Esta análise foi feita na primeira manutenção dos cadinhos em que houve acompanhamento por meio de inspeções térmicas. Por ocasião de suas manutenções eles foram inspecionados e, ao final, foi gerado um relatório contendo as principais observações. Antes de iniciar este trabalho de verificação do refratário, foi observado o projeto de revestimento e as últimas inspeções termográficas realizadas.

Nestas inspeções foram fotografadas as principais regiões do interior do cadinho, verificando o aspecto da superfície do revestimento refratário, procurando identificar as regiões críticas de desgastes (por meio de sinais de erosão, corrosão, trincas), avaliou-se os desprendimentos de material, consistência e a coloração do revestimento. Medições de espessura do refratário também foram feitas durante cada inspeção.

Para realização da inspeção visual foram necessários os seguintes materiais:

- Caçamba para armazenar o material demolido;
- Marteleto pneumático;
- Equipamentos de medição (metro, drena);
- Régua de alumínio;
- Aspirador de pó;
- Máquina fotográfica;
- Pranchetas, giz, luvas e demais equipamentos de proteção individual.

5.1.2.2.1 Metodologia de realização da inspeção:

Para tal inspeção seguiu-se o critério especificado abaixo:

- a. Avaliou-se primeiramente as dimensões de projeto de todo refratário do cadinho;
- b. Providenciou-se o resfriamento do revestimento do cadinho de forma natural sem qualquer tipo de ventilação forçada;
- c. Garantiu-se que os resquícios de banho e metal fossem cuidadosamente retirados da superfície do refratário;
- d. Fotografou-se as principais regiões do interior do cadinho, verificando se havia formação de trincas (anotando dimensões quando ocorriam), infiltração de metal, refratário desprendido, erosão e avaliado a consistência e coloração do material.
- e. Mapeou-se o cadinho, dividindo-o em oito pontos conforme pode ser observado na Figura 5.2.

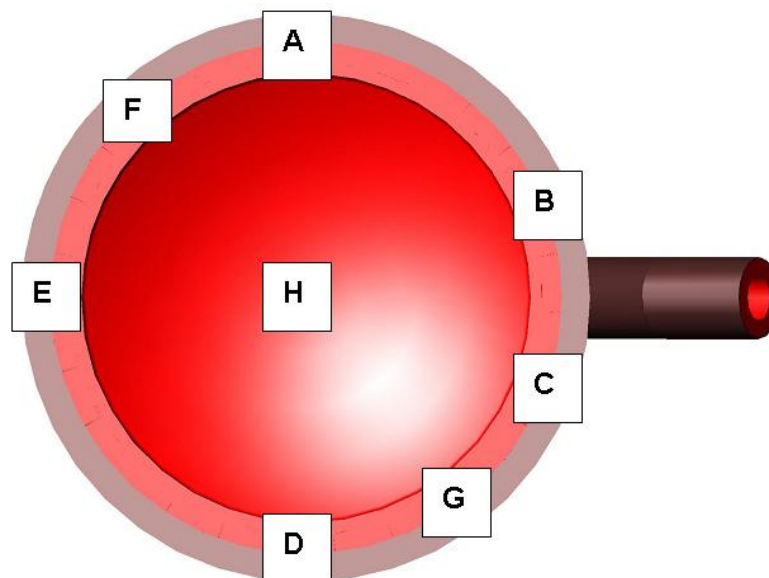


Figura 5.2 Detalhe dos locais para inspeção do cadinho

Sendo que a espessura remanescente da parede foi medida a 50% de sua altura em cinco locais distintos (pontos A, B, C, D, E), enquanto que a espessura remanescente do fundo (ponto H) foi medida no centro. Os

pontos F e G foram utilizados para verificação de infiltração de metal, uma vez que encontravam-se na interface da borda metálica e parede refratária. Para facilitar a identificação e remoção do refratário com ajuda de martelotes pneumáticos, cada local foi identificado com giz.

- f. Foi feita a inspeção com uso de martelo de bola ao longo de toda a superfície do cadinho, com objetivo de verificar existência de trechos ocos ou fofos, que ocorre com a modificação do som emitido ao se martelar a superfície do refratário (alterando de som metálico para um som abafado). Esta inspeção se iniciou com martelamento a cada meio metro quadrado e, quando percebida alguma distorção, reduziu-se o espaçamento entre as verificações, visando mapear o trecho danificado.

5.1.2.2.2 Relatório da análise post mortem

O relatório de inspeção contém um resumo informando a data da realização e os pontos visualizados, enquanto que as etapas foram detalhadas, informando condições originais de projeto, espessura remanescente do revestimento refratário, fotos da situação atual e as ocorrências visualizadas, informações de reparos propostos e executados e número de amostras coletadas. Foram ressaltadas também as ocorrências relacionadas, as informações relevantes do histórico de operação do cadinho no período em questão, quantidade de vezes que o cadinho foi limpo a frio e a quente, curva de aquecimento, número de corridas efetuadas e qual o motivo da parada do cadinho para manutenção.

5.1.3 Avaliação das melhorias do desempenho e custo de manutenção do refratário

A avaliação da eficácia das ações implantadas ocorreu,

aproximadamente após seis meses, comparando-se o desempenho dos refratários dos três cadinhos, que tiveram acompanhamento por termografia, com a vida útil média dos refratários no período de seis meses antes da implantação das melhorias. Como fonte de informação foi utilizado o relatório de manutenção de cadinhos da empresa parceira.

O resultado desta análise de desempenho e custo de manutenção do refratário após implantação das melhorias, detectadas na primeira etapa do trabalho, serão estabelecidos como referência para comparações futuras.

5.2 Segunda etapa

Para definir quais propriedades dos refratários e seus valores serão necessários para atender aos requisitos para preparação de um adequado processo seletivo, foram realizados as seguintes tarefas:

- Entendimento do processo como um todo;
- Implantação e monitoramento das melhorias necessárias;
- Conhecimento os mecanismos de desgaste e os gargalos que ainda limitam a vida útil do refratário;
- Análise das fichas técnicas dos materiais usados.

De posse destas informações que foram obtidas na primeira etapa deste trabalho, juntamente com os conhecimentos obtidos na literatura, foi possível entender a importância de cada propriedade do material refratário por meio da teoria aliada à prática operacional. Uma vez obtidos estes conhecimentos os próximos passos foram:

- Selecionar as propriedades alvo.
- Com base nas normas ASTM, ISO, DIN e medições em laboratórios, entender como as propriedades são avaliadas.
- Efetuar uma classificação das propriedades mais relevantes,

considerando-se uma visão sistêmica.

Os testes necessários para que se saiba interpretar os resultados das fichas técnicas e definir o que se gostaria das propriedades de um refratário serão apresentados nos próximos tópicos.

5.2.1 Testes para avaliação de materiais refratários

5.2.1.1 Resistência a compressão uniaxial a temperatura ambiente (RCTA)

Este teste é realizado de acordo com a norma ASTM C133 [27], com o uso de um equipamento que permita uma taxa de compressão de 1,30 mm/min. Para cada material devem ser avaliadas 5 amostras cilíndricas de 51 mm x 51 mm e cuja medida é expressa pela equação 5.1:

$$RCTA = \frac{F}{\pi \cdot R^2} \quad , \quad (5.1)$$

onde, F é a força (N) e R o raio da amostra em mm.

5.2.1.2 Resistência à flexão em 3 pontos a alta temperatura (MOR)

O ensaio de módulo de ruptura determina a resistência mecânica dos materiais cerâmicos permitindo avaliar quantitativamente qual o efeito de macro defeitos, poros, microtrincas e contornos de grão. Este teste é realizado de acordo com a norma ASTM C583 [27], com o uso de uma máquina capaz de proporcionar uma taxa de aplicação de carga de 12,5N/s. Para cada material devem ser avaliadas 5 amostras de 152 mm x 25 mm x 25mm, conforme Figura 5.1. Por meio da força medida pela máquina, calcula-se a resistência mecânica pela equação 5.2:

$$MOR = \frac{3}{2} \left(\frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \right) \quad (5.2)$$

onde, P é a carga (N); L é o comprimento entre os apoios (mm); b é a largura do corpo (mm) e h a altura do corpo (mm).

5.2.1.3 Porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA)

Este ensaio segue a norma ASTM C830 [27] e, por meio dele, cinco amostras de 50x50x50mm de cada composição são pesadas primeiramente a seco e, em seguida, estas são mergulhadas em água e submetidas ao vácuo por 1,5h. Por meio dos resultados de medição do peso imerso e peso úmido calcula-se a porosidade (%) e a densidade (g/cm^3), segundo as equações:

$$PA = \left(\frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \right) \cdot 100 \quad (5.3)$$

$$DA = \left(\frac{P_s}{P_u - P_i} \right) \cdot 100 \quad (5.4)$$

onde, P_u é o peso úmido (g), P_s o peso seco (g) e P_i é o peso imerso (g).

5.2.1.4 Resistência à Erosão

A resistência à erosão dos materiais é determinada de acordo com a norma ASTM C 704, sendo realizado por meio do equipamento Solotest. Este ensaio consiste em projetar partículas de carvão de silício sobre a superfície de um corpo de prova, em um ângulo de 90° , por meio de um bocal de ejeção a uma distância de 203 mm sobre esta superfície, usando uma pressão de ar de 448 KPa e com duração de teste de 450 segundos. A quantidade de refratário erodido, para cada corpo de prova, por abrasão, é calculada conforme equação 5.5:

$$A = \frac{M_1 - M_2}{B} \quad (5.5)$$

Onde:

A é quantidade de material erodido em centímetro cúbico; M_1 é o peso da amostra em gramas antes do teste; M_2 é o peso da amostra em gramas depois do teste e B é a densidade do material em gramas por centímetro cúbico.

5.2.1.5 Resistência ao choque térmico

Este ensaio é realizado baseado na norma ASTM C 1171, em que 6 amostras de 152 mm x 25 mm x 25 mm de cada composição são expostas a ciclos térmicos com ΔT de 1000 °C, sendo 15 minutos a 1025 °C e 15 minutos a temperatura ambiente (25 °C). Para avaliar o dano por choque térmico mede-se o módulo elástico por meio do método de ressonância de barras, antes e depois da ciclagem térmica. Como resultado, determina-se a curva de queda percentual do módulo elástico com os ciclos de choque térmico. Adicionalmente, as amostras devem ser ensaiadas mecanicamente no teste de flexão em 3 pontos, com o objetivo de avaliar a resistência mecânica residual das composições.

5.2.1.6 Permeabilidade de refratário ao ar em baixa temperatura

A medição de permeabilidade dos refratários é feita de acordo com procedimento desenvolvido por Innocentini [22]. Neste ensaio, amostras de 72 mm de diâmetro e 23 mm de espessura são introduzidas em um dispositivo e o ar é forçado a passar através deste material (Figura 5.3). As constantes de permeabilidade, k_1 e k_2 , são calculadas usando a equação de Forchheimer (equação 5.6), a partir das coletas da velocidade do ar e da queda de pressão do mesmo.

$$\frac{P_i^2 - P_0^2}{2 \cdot P \cdot L} = \frac{\mu}{k_1} \cdot V_s + \frac{\rho}{k_2} \cdot V_s^2 \quad (5.6)$$

Onde:

- P é a pressão a uma determinada vazão de ar (atm);
- P_i e P_o são, respectivamente, a pressão absoluta na entrada e saída da amostra (atm);
- L é a espessura do corpo de prova (mm);
- μ é a viscosidade do ar (Pa-s);
- ρ é a densidade do ar (g/cm^3);
- V_s é a velocidade do fluido (m/s);
- k_1 é a constante de permeabilidade (m^2) que representa as perdas de energia viscosa a baixas velocidades do ar, enquanto que o parâmetro, k_2 (m) representa a perda de energia cinética a altas velocidades.

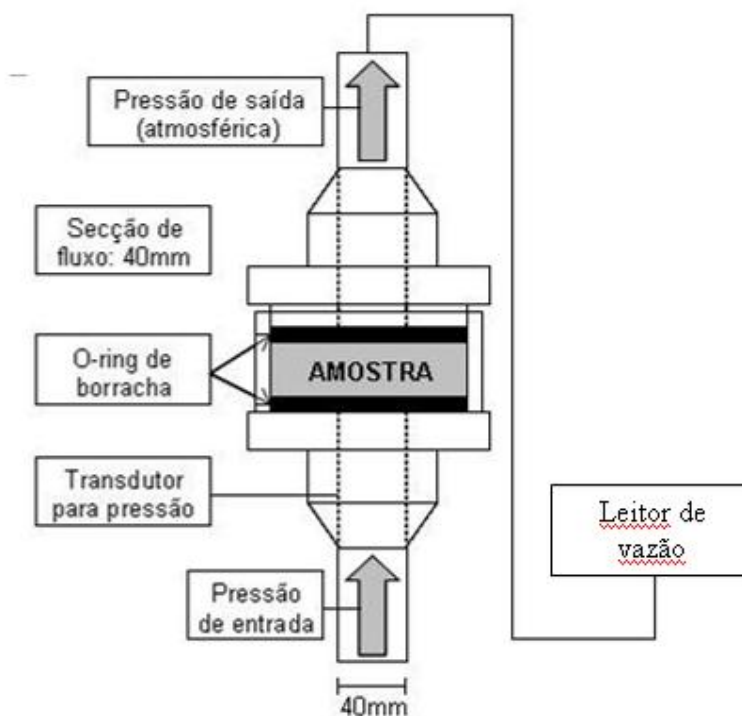


Figura 5.3 Esquema do ensaio de permeabilidade.

5.2.1.7 Refratariedade sob carga

Este ensaio é baseado na norma DIN 51053, em que um corpo cilíndrico de 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura com um furo central passante de 12

mm, é submetido a um aquecimento de 5 °C/min até 1100°C sob compressão de 0,2 MPa. Com isto, é possível medir a temperatura em que os materiais começam a deformar e, a partir deste ponto, calcula-se a temperatura quando a deformação atinge 0,5%.

5.2.1.8 Condutividade térmica

A condutividade térmica possibilita a avaliação da temperatura externa da chaparia do cadinho. Esta informação é importante para determinar a perda de energia e verificar se a temperatura não compromete a integridade do revestimento metálico externo.

O método de medição da condutividade térmica estabelecido pela norma ISO 8894-2 é a técnica do fio quente. Neste ensaio são necessários dois tijolos de mesma composição, cada um com uma das faces maior entalhadas, de modo que dois fios de platina possam ser acomodados paralelamente nas cavidades cujas profundidades sejam iguais à metade do diâmetro do fio condutor. Os fios devem ser alocados entre os dois tijolos como um “sanduíche”. Na Figura 5.4 é mostrado um esquema simplificado da técnica.

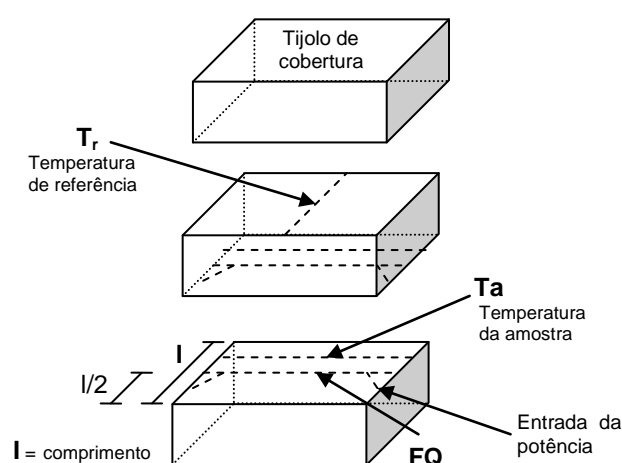


Figura 5.4 Esquemático de entalhes e montagem dos tijolos para a medida de condutividade térmica.

Por meio desta técnica determina-se a condutividade térmica pela estimativa de tempo em que o calor gerado pelo fio quente (FQ) é sentido no termopar da amostra após todo o sistema encontrar-se em equilíbrio térmico.

5.2.1.9 Ensaio de “Cup test”

O ensaio de “cup test” é um ensaio prático de ataque químico do material refratário. Apesar de não se dispor de uma norma clara sobre o teste, este tem sido aceito pela literatura especializada como uma forma de avaliação da resistência corrosiva dos refratários [28]. Por meio deste ensaio é possível a quantificação do ataque pela medida da área penetrada/dissolvida visível na secção transversal do corpo de prova.

Para o ensaio, geralmente se utiliza corpos de prova com orifício de 50 mm de diâmetro por 50 mm de profundidade (Figura 5.5). Visando simular uma condição de processo deve-se preencher o orifício com 48 gramas de alumínio e 2 gramas de banho eletrolítico. Em seguida o sistema é selado com uma lajota do mesmo material com uma argamassa aluminosa comercial.

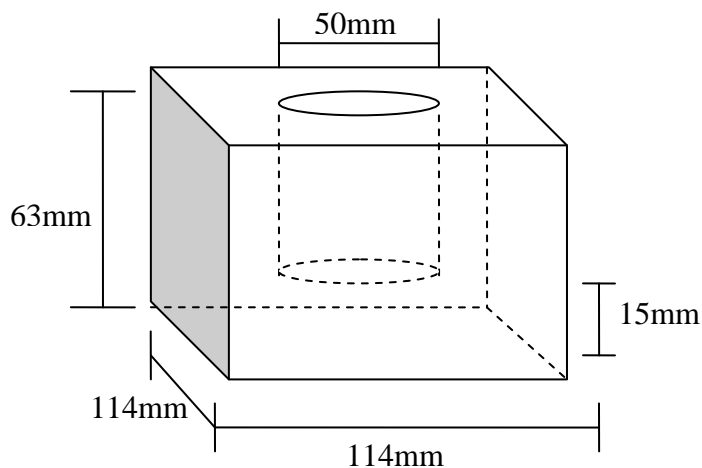


Figura 5.5 Esquema do corpo de prova para teste.

Após a secagem da argamassa por 24 h ao ar, submete-se o sistema a um aquecimento de 10 °C/min a um patamar de 1000 °C por 72 horas, seguido de um resfriamento a 10 °C/min.

A avaliação da área atacada é realizada gerando-se uma imagem com a digitação da seção transversal do corpo de prova após um corte na diagonal de sua base.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Limpeza do cadinho

Os cadinhos de transporte precisam ser limpos regularmente devido aos depósitos de banho e alumínio acumulados no seu interior (paredes e fundo), o que reduz a sua capacidade, tornando inviável operacionalmente a sua utilização. O excesso de materiais acumulados sobre o refratário também pode aumentar o grau de dificuldade do processo de limpeza. Sendo assim, esta tarefa tem influência direta na vida útil do cadinho, pois, quanto maior a dificuldade para a limpeza, maior será o desgaste do refratário.

O método mecânico é o principal meio utilizado para remoção dos materiais aderidos nas laterais e no fundo do cadinho. Muitas vezes esse tipo de limpeza é executado quando o cadinho está próximo da temperatura ambiente, resultando em fissuras ou sulcos da face quente do refratário. Esta operação torna-se ainda mais crítica quando é realizada próximo ao bico do cadinho, no encontro do tijolo refratário com o concreto. Outra grande preocupação no processo de limpeza ocorre quando há necessidade de uso de marteletes pneumáticos ou hidráulicos acoplados em máquinas retroescavadeiras ou uniloaders.

Desta maneira o impacto mecânico e a abrasão, ambos causados pela ferramenta de limpeza, marteletes e raspadores respectivamente, são os maiores responsáveis pelos desgastes do revestimento refratário. Para amenizar os efeitos danosos desta tarefa as seguintes condições devem ser atendidas:

- O cadinho deve ser limpo com temperatura interna superior a 400 °C.
- O depósito de banho e alumínio não deve estar aderido no refratário.
- Utilização de um adequado equipamento de limpeza.

Neste contexto, o conhecimento de como esta tarefa era realizada na linha de produção da empresa parceira tornou-se essencial. Como parte da

metodologia de obtenção de dados, incorporou-se no presente trabalho as informações obtidas pelos relatórios internos, juntamente com as observações de campo e entrevistas realizadas com os operadores e com a equipe de manutenção. Considera-se a metodologia de coleta de informações um importante elo entre a prática e a teoria uma vez que, em muitos casos, são necessárias adaptações nas implementações industriais que nem sempre são triviais.

A primeira informação obtida, durante a coleta de informações, foi relativa à temperatura de limpeza. Por meio dos relatórios internos, verificou-se que em média 17% destas ocorreram com o cadinho abaixo da temperatura de 400 °C (Figura 6.1), comumente chamada pelos operadores de limpeza a frio. As observações realizadas na linha de produção constataram que com o cadinho na temperatura ideal, fez-se necessário apenas o uso de uma ferramenta de raspagem. Enquanto que na limpeza a frio é necessária a utilização de rompedores pneumáticos, provocando com isto o maior desgaste do refratário.

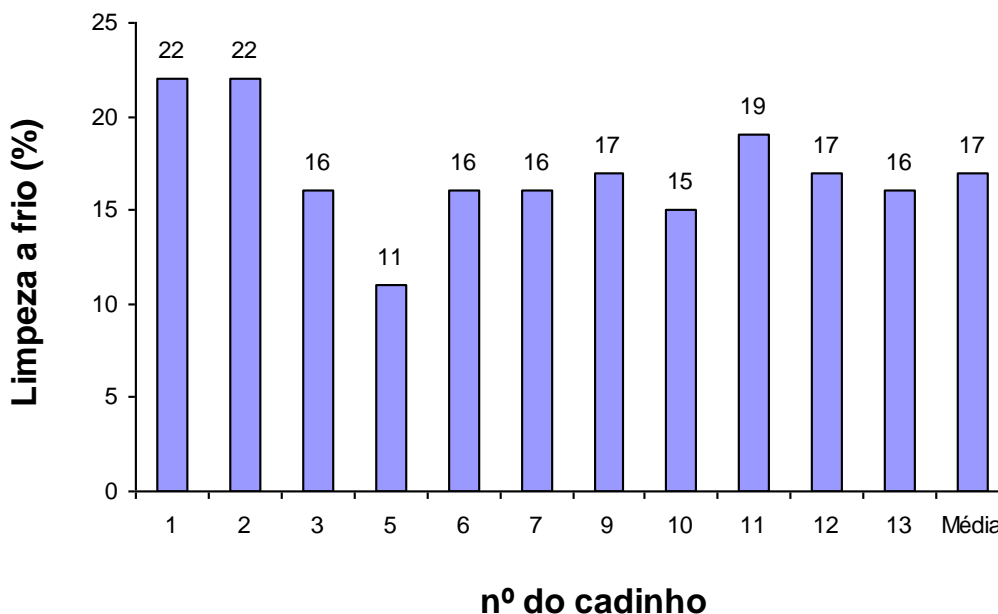


Figura 6.1 Ilustração do relatório de limpeza de cadinho [30]

Investigando-se as possíveis causas para o alto número de limpezas a frio, foi possível enumerar os seguintes fatos:

- A equipe que operava o cadinho era diferente da que efetuava limpeza.
- Não havia sincronismo entre as duas equipes, fazendo com que houvesse um longo período de espera do cadinho até que fosse efetuada a limpeza.
- O intervalo de tempo existente entre a maioria das corridas era inferior aquele necessário para colocação do cadinho no suporte de limpeza.

Analisando-se estes aspectos juntamente com a área operacional, foi possível aplicar as seguintes medidas corretivas:

- Aumento do intervalo entre as corridas.
- Planejamento diário dos horários de limpeza de cadinhos.
- Relatório diário reportando todas as não conformidades que impediram que o cadinho fosse limpo na temperatura ideal (acima de 400 °C).

Com a implantação das ações anteriormente citadas, foi possível sincronizar as tarefas entre as equipes envolvidas, permitindo a limpeza do cadinho em temperaturas acima de 400 °C e possibilitando um rápido retorno ao uso sem comprometimento do refratário.

A facilidade de limpeza do cadinho na temperatura ideal pode ser observada na Figura 6.2.



Figura 6.2 Detalhe da limpeza do cadinho acima de 400 °C

Este conjunto de ações reduziu em 40% o percentual de cadinhos limpos a frio.

De acordo com os relatórios internos e entrevistas realizadas com os operadores, a evolução do processo de limpeza nas instalações industriais da empresa parceira deste trabalho se deu da seguinte forma:

- Limpeza manual a frio (antes de 1980).
- Limpeza manual a quente (1980 – 1985).
- Limpeza mecânica a quente
 - Utilizando bobcat/uniloader (1985 – 2007)
 - Utilizando retroescavadeira (após este presente trabalho)

6.1.1 Limpeza manual a frio

Este tipo de limpeza era realizado com o cadinho resfriado na temperatura ambiente. Em seguida o operador, por um período de aproximadamente oito horas, entrava no cadinho e efetuava a limpeza com uso de marteleto pneumático manual. Com este método o desgaste do refratário era mínimo, no entanto ele oferecia as seguintes desvantagens:

- Tempo de parada do cadinho superior a 24 horas.
- Necessidade de pré-aquecimento após limpeza.
- Alto desgaste físico do operador devido ao uso de marteleto durante aproximadamente oito horas.
- Exposição do operador ao barulho e poeira.

6.1.2 Limpeza manual a quente

Este método de limpeza era realizado com o cadinho apresentando temperatura em torno de 600 °C. Antes da realização da tarefa, o cadinho era

colocado horizontalmente em um suporte apropriado. Por meio do uso de uma alavanca de aproximadamente cinco metros de comprimento, batia-se sobre as inclusões depositadas sobre o refratário e, em seguida, raspava-se o banho e o metal do fundo e da lateral do cadinho. Com este sistema o tempo de parada era de no máximo uma hora, o desgaste do refratário também era mínimo, assim como a eficiência de limpeza era bem superior comparada com o método manual a frio. Todavia ele apresentava as seguintes vantagens:

- Exposição do operador a altas temperaturas aumentava o seu desgaste físico, principalmente por meio do stress pelo calor.
- Força aplicada pelo operador na alavanca, era insuficiente para retirar todos os materiais acumulados sobre o refratário.

6.1.3 Limpeza mecânica a quente

Neste tipo de limpeza são utilizadas máquinas para retirar mecanicamente os materiais depositados sobre o refratário. Sendo assim torna-se possível a execução desta tarefa com temperatura interna do cadinho superior a 400 °C. Assim, nas instalações industriais da empresa parceira deste trabalho, observou-se que, conforme Figuras 6.3 e 6.4, utilizava-se dois tipos de equipamentos para realização desta tarefa.



Figura 6.3 Detalhe da uniloader realizando limpeza de cadinho



Figura 6.4, Detalhe da retroescavadeira efetuando limpeza de cadinho

Ambas as máquinas eram adaptadas para uso de raspadores e marteletes, possuindo toda mobilidade necessária para movimentação destas ferramentas. No entanto, a uniloader apresentava elevados custos de manutenção devido a frequentes fraturas catastróficas no suporte de sustentação do martelete pneumático. Baseado nas experiências acumuladas pelo autor deste trabalho, foi preparado um roteiro que permitiu uma matriz de decisão para avaliar qual máquina apresentava melhor custo benefício para compra, uma vez que ambos os equipamentos tinham seu tempo comprometido com outras atividades:

a-) Uniloader

- **Prós**
 - Maior eficiência de limpeza quando comparada a realizada manualmente;
 - Desgaste mínimo do refratário;
 - Tempo de limpeza superior a 20 minutos.
- **Contras**
 - Baixa robustez da máquina para a tarefa;
 - Alto custo de manutenção (em torno de R\$100.000,00 por ano);

- Ruído superior a 90 decibéis;
- Falta de climatização na cabine, expondo o operador a altas temperaturas oriundas do cadinho e do motor do veículo;
- Dificuldade de acesso e saída do interior do veículo devido à cabine ser muito compacta.

b-) Retroescavadeira

- **Prós**

- Tempo de limpeza inferior a 20 minutos;
- Equipamento altamente robusto, melhorando a eficiência de limpeza, sem danificar o refratário;
- Menor custo de manutenção comparando-se com a uniloader;
- Capital investido retorna em dezoito meses, quando comparado com o custo de manutenção da uniloader;
- Ruído abaixo de 80 decibéis;
- Cabine climatizada proporcionando maior conforto térmico ao operador;
- Cabine mais espaçosa que a uniloader;
- Facilidade de acesso, principalmente em situações emergenciais para resgate.

- **Contras**

- Custo de compra do equipamento é superior ao da Uniloader;
- Devido a sua alta robustez, necessita de ajustes na potência de trabalho para não danificar o refratário do cadinho;
- Exige maior atenção do operador para não danificar o refratário próximo ao bico do cadinho.

Por meio desta matriz de decisão foi possível justificar a compra de uma nova retroescavadeira, específica para limpeza de cadinho, pois, além de atender todas as exigências ergonômicas e não agredir o refratário em condições normais de uso, este equipamento se pagava em dezoito meses, uma vez que seria evitado o custo de manutenção da uniloader.

Com a participação do autor deste trabalho, esta máquina (retroescavadeira) tem correspondido a todas as expectativas iniciais, contudo o maior desafio desde o início de sua utilização tem sido reduzir o número de cadinhos limpos abaixo da temperatura de 400 °C. Esta preocupação é justificada pelo fato de que a limpeza mecânica de cadinho a frio exige o uso de rompedores/marteletes ao invés de raspadores, aumentando com isto o desgaste do refratário por impacto mecânico e lascamento de refratário. O uso do martelete pode ser observado na Figura 6.5.

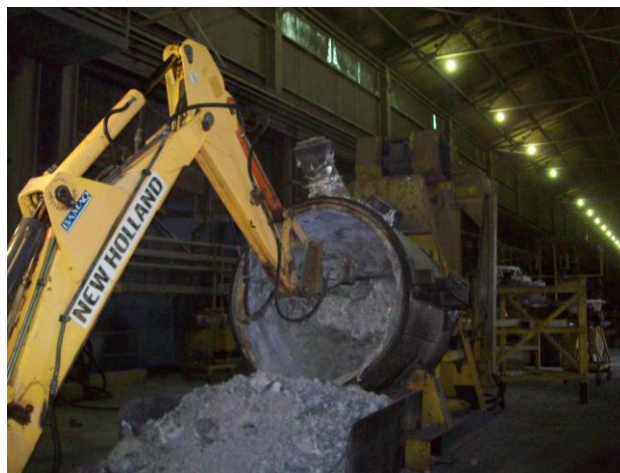


Figura 6.5 Detalhe da retroescavadeira utilizando martelete

Avaliando outras plantas de alumínio ao redor do mundo, verificou-se que são utilizados outros sistemas de limpeza totalmente automatizados e sem influência direta do operador, conforme pode ser verificado na Figura 6.6. Nestas estações de trabalho, os cadinhos são limpos por uma fresa cortante (Figura 6.7), com diâmetro próximo ao do cadinho, que gira e ao mesmo tempo penetra no interior do cadinho impulsionada por um pistão hidráulico de alta potência. Este equipamento apresenta as seguintes vantagens adicionais:

- Efetua limpeza a quente e a frio sem danificar o refratário;
- Elimina o impacto mecânico devido a não utilização de martetele;
- Tempo de limpeza inferior a 10 minutos;
- Corte e avanço da fresa controlados automaticamente por computador;
- Elimina a exposição dos operadores a partículas de poeira e calor;
- Prolonga a vida do refratário devido à ação de corte uniforme.

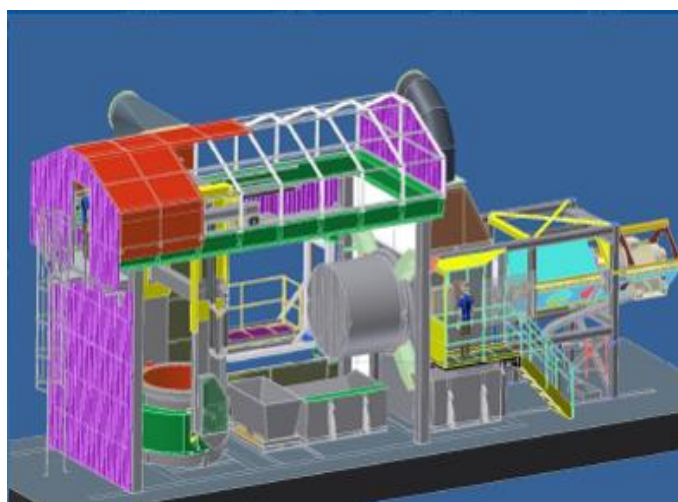


Figura 6.6 Desenho de uma máquina automática de limpeza de cadinho [32]



Figura 6.7 Detalhe da fresa de uma máquina automática de limpeza de cadinho [33]

Apesar das inúmeras vantagens da estação automática de limpeza de

cadinho, sua aquisição tornou-se inviável devido ao fato de que o retorno do capital investido ocorrerá somente após 15 anos de implantação, trazendo com isto várias incertezas para o futuro, principalmente quanto à descoberta neste período de outras soluções com custo inferior ao equipamento proposto.

6.2 Aplicação / manutenção do refratário

A manutenção ou a troca do refratário torna-se necessária todas as vezes que este revestimento não está isolando termicamente dentro dos limites de projeto, colocando em risco a segurança do processo e o desempenho do equipamento. Outros riscos associados como fluência, descarbonetação e oxidação da carcaça metálica também podem ser provocados em temperaturas elevadas [1]. Desta maneira, para que possa ser garantida a integridade da estrutura metálica do cadinho, a substituição do refratário deve ocorrer periodicamente.

O procedimento de instalação e a qualificação dos instaladores são imprescindíveis para a obtenção das propriedades desejadas. Falhas decorrentes de instalação afetarão a microestrutura do material refratário e diminuirão sua resistência à penetração de alumínio no revestimento. De posse destes conceitos, buscou-se analisar criteriosamente todo processo de manutenção de cadinhos realizado nas instalações industriais da empresa parceira.

Conforme pode ser observado na Figura 6.8, os cadinhos que têm capacidade de transporte de aproximadamente sete toneladas, são revestidos internamente com dois tipos de refratários em três regiões distintas (fundo, parede e bico). A parede é composta de tijolos circulares, assentados com utilização de argamassas, enquanto que no bico e no fundo é utilizado concreto refratário. Durante a coleta de informações referentes à troca de refratário de cadinhos, foram evidenciadas os seguintes aspectos:

- Realizava-se manutenção corretiva de refratários;

- Existia desnivelamento na qualificação dos aplicadores de refratário;
 - Não existia um procedimento padrão de aplicação de materiais refratários;
 - Inexistência de uma correta homogeneização, dosagem, mistura e temperatura da água, assim como controle de tempo de mistura;
 - A concretagem do fundo do cadinho e seu sistema de pré-aquecimento, após manutenção, não atendiam as recomendações do fabricante de concreto;
- O material refratário utilizado precisava ter seu desempenho melhorado.

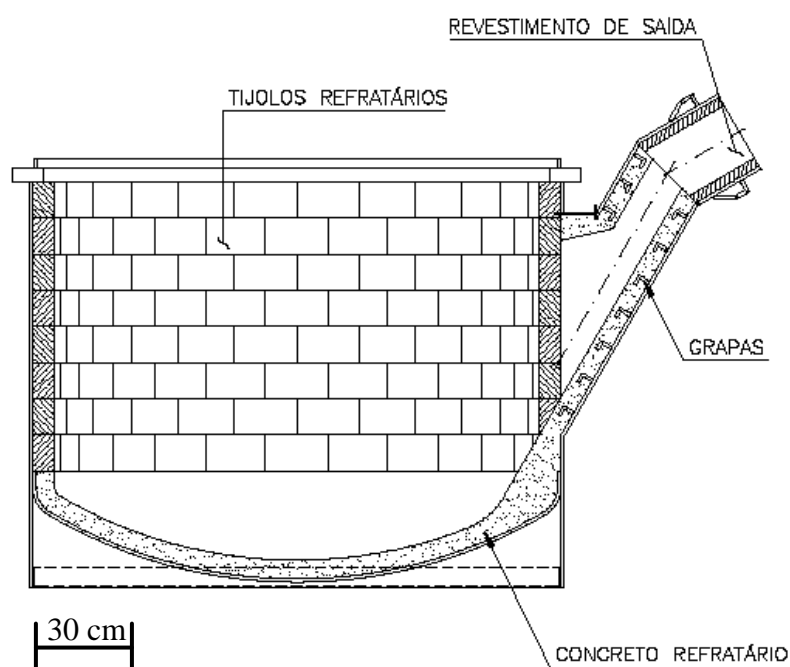


Figura 6.8 Elevação em corte com detalhes do cadinho

Após o levantamento destas informações tornou-se compreensível o alto espalhamento no número de corridas realizadas por cadinho, conforme pode ser verificado na Tabela 6.1, em que é possível obter os seguintes dados:

- 45% dos cadinhos apresentavam vida útil entre 190 a 265 corridas
- 45% dos cadinhos apresentavam vida útil entre 303 a 366 corridas
- 10% dos cadinhos tinham vida útil superior a 466 corridas.

Tabela 6.1 Sumário do relatório de manutenção de cadinhos [34]

Nº cadinho	1	2	3	5	6	7	9	10	11	12	13
Nº corridas entre as intervenções	303	195	261	265	360	366	213	467	329	355	198

Por meio destes dados e das informações coletadas em campo, analisando sistematicamente as possíveis soluções, tornou-se claro a necessidade de dividir este trabalho em duas etapas. A primeira teve como foco melhorar a qualidade de aplicação/manutenção e secagem do refratário, pois, somente após a estabilidade destes dois processos, seria possível estabelecer referências para comparações futuras. A segunda etapa visou definir um modelo de referência especificando propriedades, valores e características do refratário mais adequado. O detalhamento destas duas etapas será apresentado nos próximos tópicos.

6.3 Primeira etapa de melhorias

Para melhorar a qualidade de aplicação e secagem do refratário, foram implantadas as seguintes melhorias:

- Manutenção preventiva e preditiva de refratários;
- Nivelamento técnico dos aplicadores de refratário;
- Elaboração de um procedimento padrão de aplicação dos materiais refratários;
- Alteração do método de aplicação do concreto utilizado no fundo do cadinho;
- Adequação do pré-aquecedor para secagem do concreto de acordo com as recomendações do fabricante do refratário.

A avaliação da eficácia das ações implantadas aconteceu, aproximadamente, após seis meses, comparando o desempenho do refratário

antes e depois da implantação das melhorias. O resultado desta análise de custo e benefício foi utilizado como referência para comparações futuras.

6.3.1 Manutenção preventiva e preditiva de refratários

De acordo com os relatórios internos da empresa parceira deste trabalho, mais de 90% das horas extras dos aplicadores de refratário ocorriam devido a falhas acumulativas em vários cadinhos. Com isto tornava-se necessário a intervenção emergencial da manutenção para evitar perdas ou atrasos na produção de alumínio.

Visando-se diminuir o número de intervenções corretivas, redução de custo com horas extras e para proporcionar um aumento na disponibilidade operacional, foi implantada a manutenção preventiva de cadinhos. Para preparação do plano de manutenção foram seguidas as orientações de Bernardes [10] e Lafraia [11], que sugerem efetuar um estudo estatístico baseado na confiabilidade do refratário, utilizando como informações os dados obtidos na Tabela 6.1 [34].

Para amenizar o impacto causado pela alta dispersão no intervalo do número de corridas antes de cada manutenção corretiva, optou-se, também, por fazer o monitoramento do desempenho da vida útil do refratário por meio de manutenção preditiva. Isto foi realizado por meio do uso de inspeções termográficas da carcaça metálica do cadinho, conforme está descrito no tópico 6.3.5.1.

6.3.2 Nivelamento técnico dos aplicadores de refratário

O nível de qualidade do revestimento refratário depende de diversos fatores, porém, o mais relevante é o conhecimento e a experiência da mão de obra que aplicará o refratário. Esta preocupação primária motivou, logo de início, a elaboração de um treinamento para nivelamento técnico de todos os

aplicadores de refratários responsáveis pela manutenção de cadinhos. Baseado nas sugestões de Bernardes [10] e utilizando as recomendações da ISO 9000 e das normas ASTM [27], juntamente com este treinamento foi elaborado o procedimento de aplicação dos materiais refratários.

Por meio deste procedimento e do treinamento obrigatório para todos os novos profissionais, assim como a reciclagem anual dos aplicadores, procurou-se garantir a eficiência na qualidade dos serviços executados. Nas Figuras 6.9 e 6.10 pode ser verificado um cadinho em processo de manutenção.



Figura 6.9 Detalhe externo do cadinho em manutenção

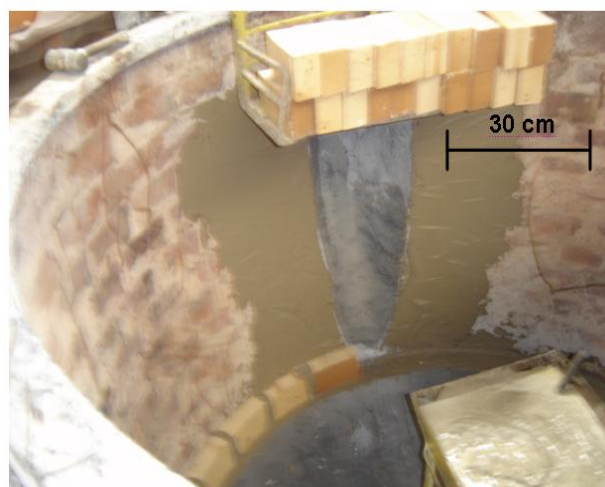


Figura 6.10 Detalhe interno do cadinho em manutenção

6.3.2.1 Procedimento padrão para aplicação de refratários

Este procedimento é uma descrição detalhada de todas as etapas que envolvem a aplicação/manutenção de refratário em cadinhos. Por meio deste documento buscar-se-a educar todos os atuais e novos aplicadores de refratário, na padronização de cada atividade, evitando-se com isto a execução da mesma tarefa de maneira distinta. Os principais aspectos abordados neste procedimento são:

- A sequência de aplicação do refratário envolverá primeiramente o vertimento de concreto no fundo do cadinho, em seguida o assentamento de tijolos na parede e depois a concretagem do bico. O intervalo de execução entre estas tarefas deverá ser no mínimo de 12 horas.
- **Armazenamento do concreto:** Para que não haja comprometimento do material, este deve ser armazenado em local coberto, seco e arejado, acondicionado sobre estrados de madeira e livre de umidade.
- **Planejamento:** O planejamento e preparação do serviço deverão ser feitos com antecedência, independente da quantidade de material aplicado. Com estes cuidados será possível:
 - Garantir a quantidade de material, equipamentos e mão de obra na medida e no tempo adequado;
 - Definição de todas as possíveis interferências durante a realização da manutenção.
- **Preparação e aplicação do concreto:** Para que a aplicação de concreto tenha sucesso deverão ser utilizadas as seguintes recomendações e técnicas:
 - Não será permitido o emprego de concreto com embalagens violadas, com prazo de validade expirado e o uso de concretos de diferentes fabricantes.
 - Deverá ser efetuada uma pré-mistura da massa seca, por meio de misturadores, durante aproximadamente um minuto, para

evitar segregações de grãos grossos e finos durante o transporte e manuseio.

- Deverá ser seguida a orientação do fabricante sobre a quantidade de água recomendada para cada tipo de material. Para se checar se o teor de água está correto, deverá ser feito uma pelota do material com as mãos e observar se é visível uma fina película de umidade. Em seguida deverá atirar a bola para cima a cerca de 30 cm e apanhá-la. Se a bola deformar e chegar ao ponto de escoar por entre os dedos é porque está com excesso de umidade (Figura 6.11). Se a bola quebrar, a quantidade de água é insuficiente (Figura 6.12).



Figura 6.11 Concreto com água em excesso [27]

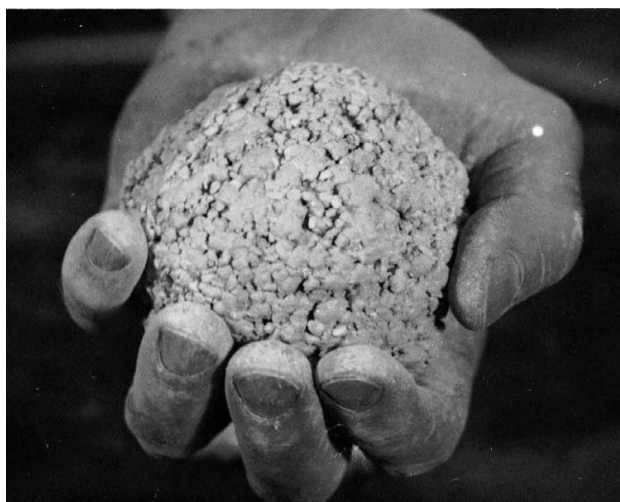


Figura 6.12 Concreto com baixa consistência de água [27]

- A adição de agulhas metálicas deverá ser realizada na fase de pré-mistura com o misturador em operação por meio de uma peneira, para que ocorra distribuição uniforme destas.
- A faixa de temperatura para mistura do concreto deverá estar entre 19 °C a 24 °C durante a aplicação, podendo-se variar a temperatura da água ou do concreto para atingir essa faixa.
- É recomendado a utilização de um misturador de tambor rotativo de eixo vertical e 4 pás rotativas de eixo horizontal. O tempo de mistura deve ser entre 2 e 3 minutos ou de acordo com a orientação do fabricante.
- Os misturadores necessitam ser lavados periodicamente, para evitar aderência de material.
- O método de aplicação de concreto no cadinho é por derramamento em formas de madeira para o bico e metálica para o fundo. A superfície de contato das formas com o concreto devem ser impermeabilizadas com óleo ou agente desmoldante.
- Nunca se deve tentar recuperar a trabalhabilidade da mistura já com início de pega (endurecimento) iniciado, pois, na tentativa de amolecer o concreto, há uma redução completa de sua resistência mecânica.
- Para compactação de concreto deve-se utilizar vibradores internos, inseridos na massa em posição vertical, por um período de trinta segundos a um minuto e com distanciamento de inserção inferior a 60 cm. O término da vibração é verificado quando não se observa mais despreendimento de bolhas de ar e com a formação de uma fina camada de partículas na superfície. A compactação adequada do concreto confere maior resistência mecânica, condutividade térmica e densidade.
- Caso a superfície do concreto, depois de retirada das formas, mostrar-se demasiadamente lisa, deve-se torná-la rugosa por meio de escovamento ou jateamento antes de iniciar a secagem, visando facilitar a remoção da água durante a secagem.

- **Testes do material aplicado:** Os testes deverão ser realizados, no mínimo 24 horas após a concretagem, com a retirada das formas, executando os seguintes passos:
 - Inspeção visual em 100% da superfície, com o objetivo de verificar presença de trincas, redução de espessura ou defeitos decorrentes de uma má aplicação do concreto.
 - Penetração de estilete de 3,0 mm de diâmetro verificando cura deficiente ou região frágil.
 - Efetuar teste com martelo de bola de aço de 250 gramas a cada 50 cm, verificando vazios ou compactação deficiente, caracterizada por diferentes defeitos sonoros.
- **Aplicação de tijolos refratários:** Os tijolos deverão ser assentados com argamassa úmida de pega ao ar, de acordo com as seguintes recomendações:
 - Não é necessário adicionar água adicional na argamassa, ela apenas necessita ser misturada no próprio balde de acordo com as orientações do fabricante.
 - Não se deve deixar o balde da argamassa aberto, para evitar o início da pega.
 - A espessura da argamassa deve ser em torno de dois milímetros.
 - Os tijolos devem ser assentados utilizando-se prumo, nível e esquadro.
 - A amarração dos tijolos, que consiste no desencontro entre as peças, é de fundamental importância para obtenção de resistência estrutural.
 - Não deverão ser reaproveitados restos de argamassa caídos no chão. A argamassa não deve ser amolecida com água.
 - Não retirar a diferença da altura dos tijolos com maior espessura de argamassa.
 - Garantir uniformidade da espessura do revestimento.
 - A utilização de massa plástica é permitida somente para preencher o espaçamento entre a última fiada de tijolo e a borda

metálica do cadinho, desde que este espaço seja inferior 50% da espessura do tijolo (38 mm).

- Fazer inspeção visual, após término da aplicação, em todo o revestimento, verificando principalmente nível e prumo.

A confecção do procedimento de aplicação de materiais refratários resultou uma alteração significativa na maneira de concretagem do fundo do cadinho. Alteração esta que, devido a seu alto grau de importância, será tratada individualmente a seguir.

6.3.3 Concretagem do fundo do cadinho

Conforme pode ser verificado na Figura 6.9, a formação côncava do fundo do cadinho em estudo não apresenta geometria favorável para derramamento e moldagem do concreto. Sendo assim existem quatro formas para aplicar o refratário:

- **Utilização de um concreto de pega química** (massa de socar), aplicado por socagem manual (com martelo de borracha) ou com a utilização de socadores pneumáticos.
- **Instalação de formas** com concavidade similar a do fundo do cadinho, para permitir derramamento e vibração do concreto.
- **Projeção pneumática (gunning)**: De fácil aplicação, não necessita utilização de formas, sendo pré-misturado em um equipamento comum e transportado para uma máquina especial de projeção. Por meio desta máquina o material pré-misturado é arrastado por ação do ar comprimido através de uma mangueira. Na ponta da mangueira existe um bocal com dispositivo controlado pelo operador, para adição de água na mistura.
- **Projeção a Úmido (Wet Gunning)**: É um método de projeção pneumática em que o material é aplicado já umedecido pela mangueira.

Na ponta do bocal é introduzido um aditivo especial que proporciona baixa fluidez e alta viscosidade no material, características essas que são necessárias para a projeção.

Durante a coleta de informações sobre como esta tarefa era realizada, verificou-se a utilização de concreto aplicado com o emprego de socador pneumático. Todavia, quando se analisou a ficha técnica do material, observou-se que esta aplicação era inadequada, pois o fabricante do concreto indicava que este deveria ser aplicado por derramamento com vibração interna ou externa.

Esta aplicação errônea do concreto, que era executada por mais de vinte anos, somente era possível devido à adição de água abaixo da faixa recomendada pelo fabricante. Esta prática, segundo Bernardes [10], leva a ter água insuficiente para reações exotérmicas de hidratação, além de reduzir a resistência mecânica a frio e influenciar negativamente as propriedades finais do revestimento.

Como nesta primeira etapa de melhorias não estava previsto desenvolvimento de novos materiais, como massa de socar e concretos projetáveis, solicitou-se à engenharia da empresa parceira deste trabalho a execução de um projeto de uma forma metálica removível, para o fundo côncavo do cadinho. Uma vez projetada e confeccionada, conforme Figuras 6.13, 6.14 e 6.15, esta forma possibilitou o derramamento e vibração do mesmo concreto que era aplicado anteriormente. Esta mudança na forma de concretagem do fundo trouxe os seguintes benefícios:

- Utilização do concreto de acordo com as orientações do fabricante.
- Possibilitou a correta dosagem de água e o grau de compactação adequado para o concreto utilizado.
- Aumentou a resistência mecânica do concreto, contribuindo para um acréscimo de 83% na vida útil do refratário.

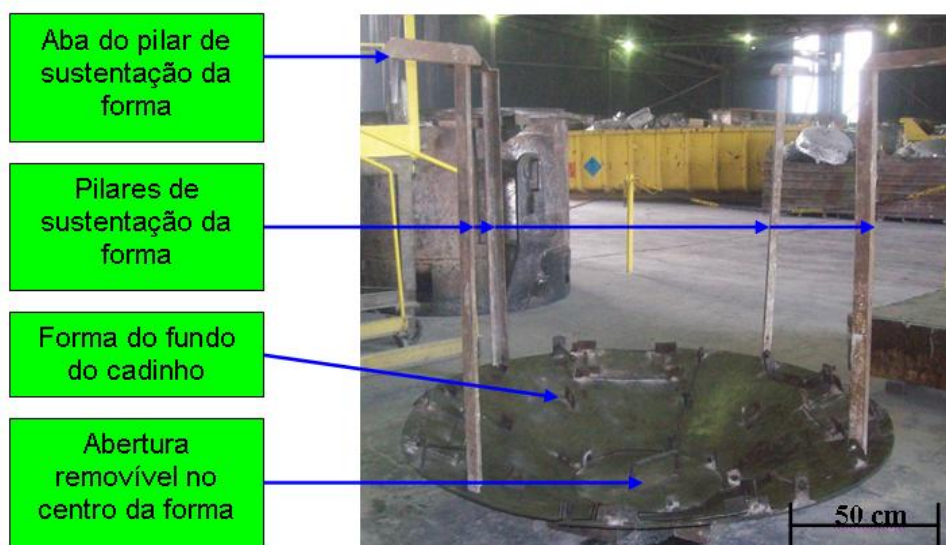


Figura 6.13 Detalhe da forma do fundo do cadinho montada externamente

Por meio da Figura 6.14 é possível visualizar como fica a forma após ser montada dentro do cadinho. Como a forma necessita ficar suspensa para concretagem do fundo, ela é sustentada por 04 pilares com abas presas na borda metálica do cadinho (Figura 6.15).

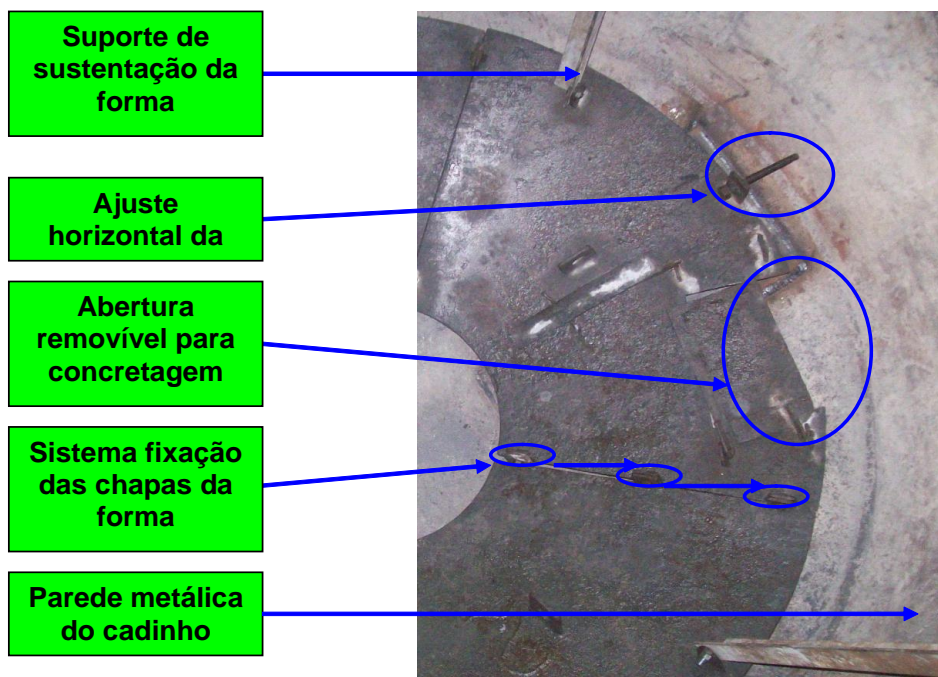


Figura 6.14 Detalhe da fixação/ajuste horizontal da forma no interior do cadinho

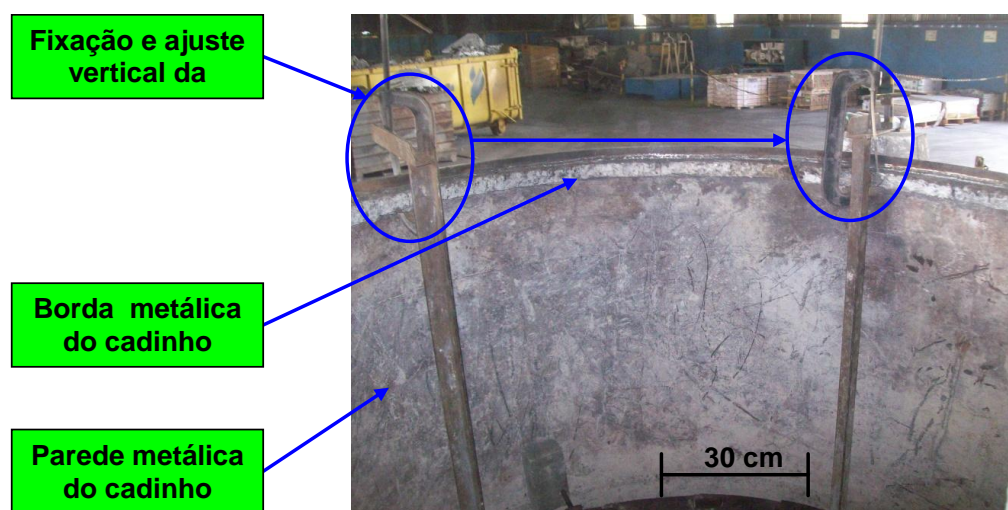


Figura 6.15 Detalhe da fixação vertical da forma do cadinho

Devido à dificuldade de içamento e montagem no interior do cadinho, a forma foi seccionada em sete partes, sendo seis perimetrais e uma central. Primeiramente só as peças perimetrais são fixadas entre si, por meio de parafusos, pois a parte central precisa ficar aberta para permitir a movimentação do montador no fundo do cadinho. A próxima etapa consiste em manter a forma suspensa e, para que isto seja possível, são fixados os pilares de sustentação, na forma e na borda metálica do cadinho. Para finalizar a montagem são feitos os devidos ajustes vertical e horizontal, conforme Figuras 6.15 e 6.16 e, em seguida, fixada a peça central da forma com parafusos.

A finalidade dos ajustes é garantir que a espessura de concreto refratário atenda as especificações de projeto. Por meio do ajuste vertical se regula a espessura da parede, enquanto que o ajuste horizontal controla a espessura do fundo do cadinho. Sendo assim, o vertimento e a vibração do concreto podem ser realizados utilizando o espaçamento existente entre a forma e a parede metálica do cadinho.

6.3.4 Pré-aquecimento do refratário

Os concretos refratários são materiais constituídos de partículas de diversos tamanhos (matriz e agregados) unidas pela ação do ligante hidráulico

(cimento de aluminato de cálcio e as aluminadas hidratáveis). Desta forma a água adicionada tem grande importância no desempenho do concreto, pois, poderá variar significativamente em natureza e quantidade.

Uma vez adicionada no concreto, parte da água, chamada “água livre” fica retida nos poros após o processo de cura. O restante chamado “água estrutural”, se liga quimicamente aos hidratos cristalinos e amorfos. Logo, o uso de uma adequada curva de secagem (pré-aquecimento) é crucial para prevenir o dano mecânico do refratário por meio de pressurização excessiva, causada pelo vapor gerado durante o pré-aquecimento [35].

No processo de secagem a remoção de água é efetuada em três estágios [35,36]:

- Evaporação da água livre;
- Ebulição da água livre;
- Liberação da água quimicamente ligada quando é atingida a faixa de temperatura de decomposição de cada fase.

A intensidade e duração de cada período dependem de [35]:

- Curva de pré-aquecimento aplicada.
- Características do refratário:
 - Permeabilidade;
 - Condutividade térmica;
 - Teor de cimento;
 - Relação de superfície/volume;
 - Espessura

A remoção controlada de água livre é um aspecto importante para prevenir a fragmentação explosiva de corpos verdes durante a secagem. Sendo assim, Innocentini [35] define os estágios críticos (evaporação e ebulição) da secagem da seguinte maneira:

Evaporação: ocorre quando a temperatura do corpo refratário encontra-se em temperaturas $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependendo de:

- Rede de poros (porosidade, tamanho de poros e permeabilidade);
- Propriedades da água (viscosidade, densidade e tensão de superfície);
- Condições externas (temperatura do forno, umidade relativa do ar e exposição para o fluxo de ar).

Neste estágio, a secagem dos meios porosos em condições isotérmicas ocorre por diferentes meios de transporte. Inicialmente a água é transportada por forças de capilaridade até a superfície do corpo em que é evaporada, influenciada pela temperatura e pressão parcial de vapor. Em seguida, quando a interface líquido / vapor avança para o interior do corpo refratário, a secagem ocorre por difusão de vapor seguindo-se até o equilíbrio ser alcançado.

A evaporação, principalmente no início, é um período de secagem altamente sensível à mudança de atmosfera ambiente. Portanto, é esperado que o desempenho total da secagem dependa da temperatura ambiente e do tempo necessário para o corpo alcançar esta temperatura.

- **Ebulição:** Começa quando o ponto de ebulição da água ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 1 atm) é alcançado no concreto. Nesta temperatura a pressão de vapor do líquido (P_V) iguala-se à pressão total do ambiente (P_T), permitindo que as bolhas de vapor sejam formadas e migrem para a superfície através do volume líquido. Neste estágio, a pressão de vapor age como a principal força motriz para expelir a água em direção à superfície do corpo, acelerando a taxa de secagem. No entanto, uma expansão volumétrica de vapor durante um curto espaço de tempo ou uma estrutura com baixo nível de permeabilidade pode, algumas vezes, quebrar as ligações hidráulicas e causar explosões ou fragmentação do refratário. Este fato, além de comprometer a integridade mecânica do material, poderá afetar a segurança das pessoas e equipamentos envolvidos no processo de secagem.

A secagem pode ser efetuada seguindo dois procedimentos distintos, sendo eles o aquecimento em patamares e o aquecimento em rampa. Testes termogravimétricos conduzidos por Innocentini [35] constataram que quando a secagem foi realizada em patamares, a remoção de água foi mais eficiente do que a realizada em rampa. Segundo este autor, a curva em patamares obteve melhor desempenho, devido a sua maior eficiência de transferência de calor. Sendo assim, o aquecimento de um corpo sólido é totalmente dependente do tempo, pois há necessidade do calor se propagar de sua fonte para o sólido, geralmente por convecção, e em seguida transferida para todo o corpo por condução [36]. Deste modo pode-se concluir que as dimensões e características geométricas das peças refratárias influenciam diretamente na secagem e tendência à explosão.

Em corpos de grande espessura é comum a ocorrência de gradientes de temperatura, que além de gerar gradientes de tensões no corpo também são responsáveis pelo aparecimento de fenômenos físicos que alteram a difusão de vapor nas estruturas cerâmicas, quando a interface líquido/gás avança na direção do interior da peça [36].

Diante da complexidade envolvida na secagem de concretos refratários, buscou-se com este trabalho garantir que os conhecimentos obtidos na literatura, juntamente com as orientações do fabricante, fossem seguidas, pois só assim seria possível alcançar a resistência mecânica adequada na temperatura de operação, de maneira controlada.

Para secagem de refratários geralmente são utilizados pré-aquecedores a gás, a óleo ou elétrico. Nestes três tipos de aquecimentos, os equipamentos podem ser externos, utilizados somente com a finalidade de secagem do refratário, ou internos, em que é utilizado o próprio sistema de aquecimento operacional do equipamento (exemplo: fornos).

Para pré-aquecimento do refratário de cadinhos, o sistema mais utilizado é o pré-aquecedor a gás, porém o sistema elétrico tem se mostrado uma excelente opção de uso [37, 38]. Para melhor entendimento e para possibilitar uma melhor avaliação dos sistemas, a seguir será mostrado como atuam estas duas formas de aquecimentos com suas vantagens e desvantagens.

6.3.4.1 Pré-aquecimento a gás

Para entendimento do funcionamento do pré-aquecimento a gás fez-se necessário o conhecimento de informações básicas do processo de combustão.

Primeiramente, combustão é uma reação química exotérmica entre combustível e comburente (oxigênio) para liberação de calor. A maioria dos processos industriais utiliza o ar ambiente como fonte de fornecimento de oxigênio. Já os combustíveis podem ter origem fóssil ou vegetal e são constituídos geralmente por carbono, hidrogênio, oxigênio e, em alguns casos, enxofre. Todavia, apesar de ambos os tipos de combustíveis serem similares, os fósseis são dotados de uma capacidade superior de liberação de energia durante a combustão [40].

Qualquer combustível convencional requer, de acordo com sua composição, uma quantidade específica e calculável de oxigênio (ar ambiente) para atingir teoricamente uma reação completa [39]. O descontrole desta mistura poderá provocar dois extremos:

- Menor quantidade de oxigênio irá produzir uma combustão incompleta, tendo como consequência a perda de calor potencial.
- Maior quantidade de oxigênio gera perdas excessivas de gás de combustão e temperatura.

Sendo assim, o conhecimento das necessidades de ar para combustão, bem como da composição e volume dos produtos de combustão, é fundamental para o projeto e controle de equipamentos de combustão.

No processo de combustão contínua de gás, as chamas são obtidas através da descarga contínua dos reagentes pelo bocal ou bocais do queimador. Basicamente, elas são classificadas em chamas de difusão e chamas pré-misturadas (utilizadas no pré-aquecedor do cadinho em estudo).

As experiências mostram que a combustão dos reagentes gasosos só ocorre em certas condições propícias, após ignição dos reagentes pré-

misturados em proporções adequadas obtidas em queimadores. Como os combustíveis gasosos são geralmente misturas de gases que podem ser facilmente identificados individualmente, é possível, por meio do uso da estequiometria química, obter os principais dados necessários para calcular a quantidade teórica de ar e da composição dos produtos de combustão [39].

Se a composição do combustível e dos produtos de sua combustão é medida, o rendimento da combustão pode ser calculado comparando-se as informações obtidas pela estequiometria com a composição real obtida pela análise dos gases de combustão. Por meio deste comparativo será possível verificar:

- Se o ar está sendo utilizado na quantidade certa.
- Possível desperdício de quantidade de calor devido ao aquecimento de quantidades excessivas de gases de combustão.
- Se há presença de monóxido de carbono (CO), fuligem, combustível não queimado e possivelmente hidrogênio nos produtos combustíveis.

A análise dos gases de combustão é comumente relatada em base seca de volume, isto é, sem considerar a água no gás. Uma grande variedade de equipamentos é utilizada para análise do gás, dentre eles o Orsat, Fyrot e outros aparelhos contínuos [39].

De posse destes conceitos, iniciou-se a coleta de informações sobre o sistema de pré-aquecimento do cadinho, objeto deste estudo. Foi evidenciada a secagem de concreto refratário, utilizando-se um pré-aquecedor cujo combustível utilizado é o gás GLP e o ar ambiente é a fonte de oxigênio. Com mais de 20 anos de uso, o sistema de combustão é montado em uma tampa com revestimento refratário conforme pode ser ilustrado no exemplo das Figuras 6.16 e 6.17 [41].

Verificando o registro de pré-aquecimento de vários cadinhos, observou-se que a curva de aquecimento detectada pelo sensor de temperatura, colocado dentro do cadinho, encontrava-se bastante distinta da curva recomendada pelo fabricante e programada no sistema de controle do pré-

aquecedor conforme pode ser observado no exemplo representado pela Tabela 6.2 e Figura 6.18.

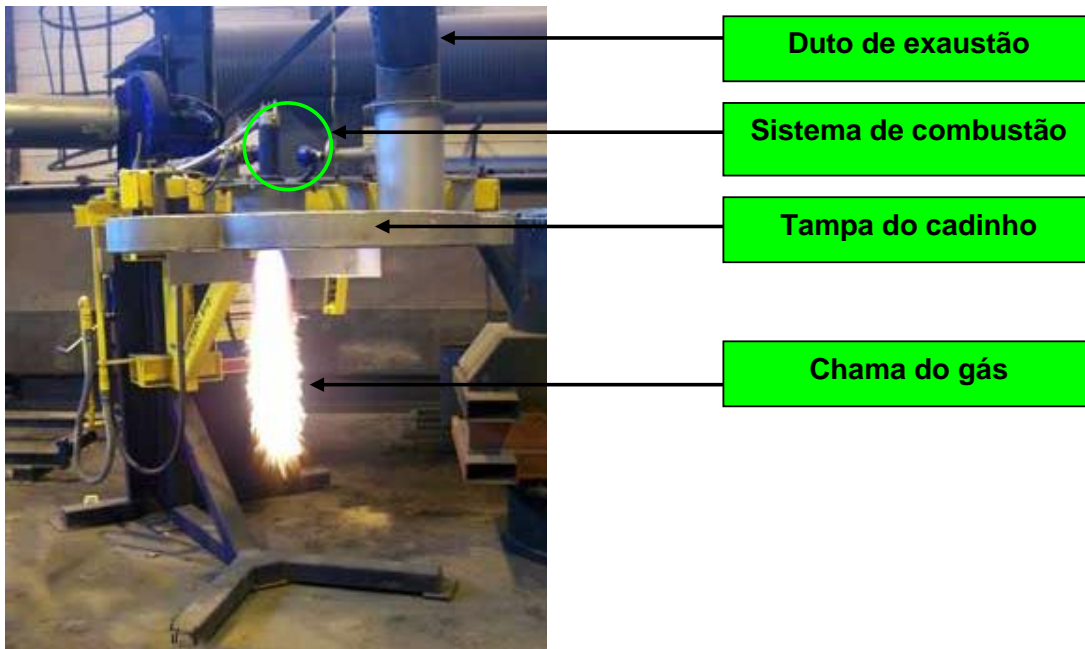


Figura 6.16 Detalhe da tampa de um cadinho [41]

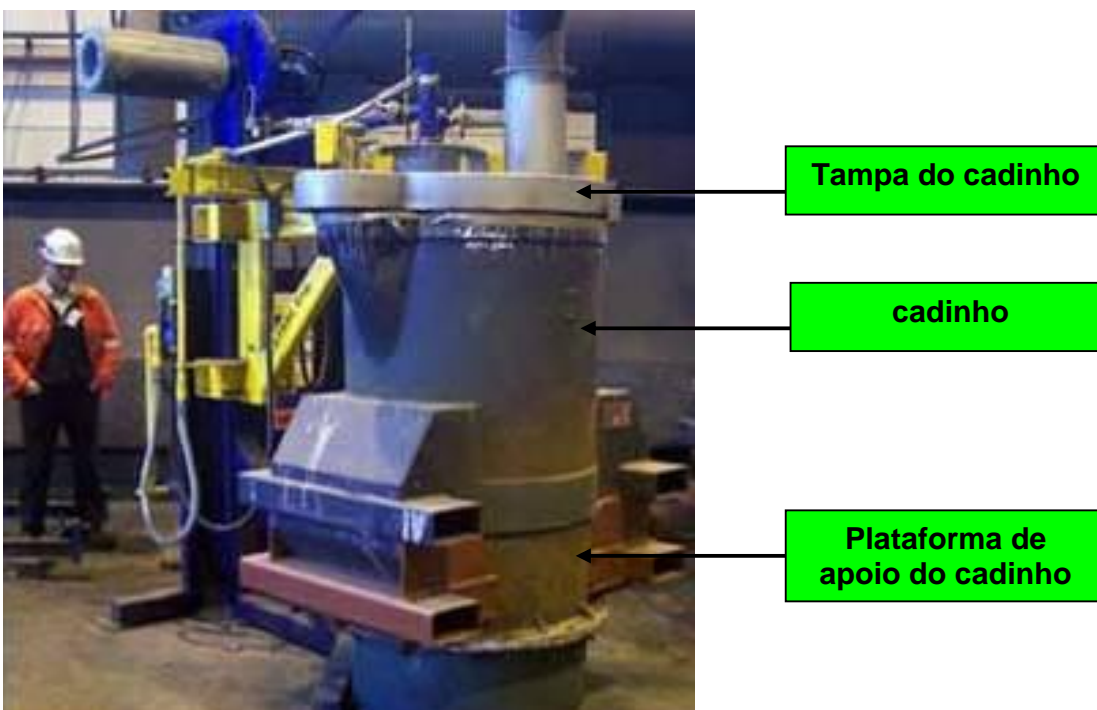


Figura 6.17 Detalhe da tampa sobre o cadinho [41]

Tabela 6.2 Sumário do relatório de manutenção de cadinhos antes dos ajustes no pré-aquecedor [34]

Tempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Temperatura (real)	27	283	365	300	336	390	450	500	545	589	635	680	730	80	830	835	840	880	900	905	905	905	912	915	914	915	916
Temperatura (Programada)	27	50	100	100	150	150	150	200	250	300	350	350	350	350	400	450	500	550	600	650	750	750	800	850	900	950	950

Pré-aquecimento de cadinho

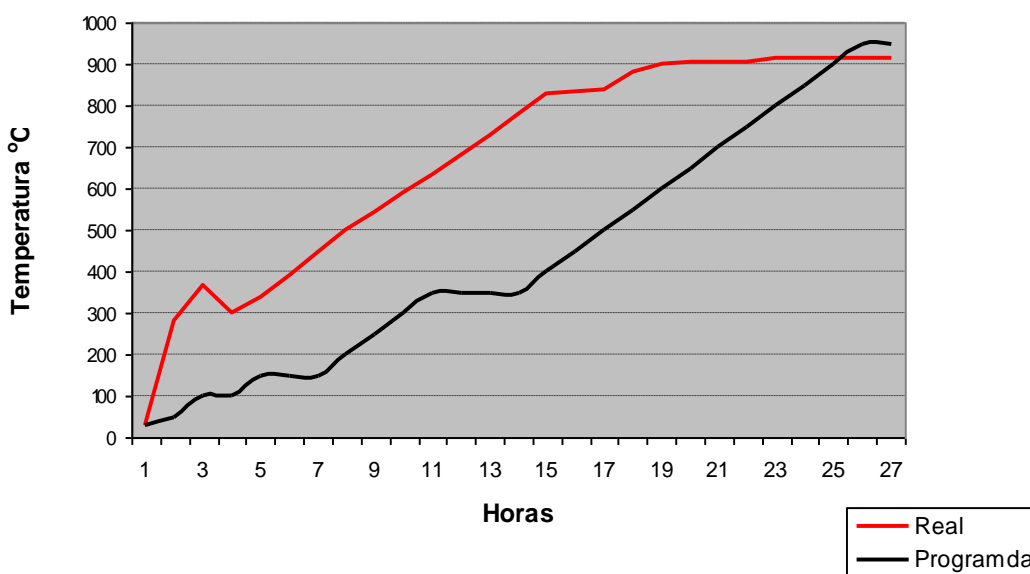


Figura 6.18 Ilustração do relatório de manutenção de cadinhos antes dos ajustes no pré-aquecedor [34]

Por meio do resultado desta secagem pode-se verificar que a temperatura que deveria ser alcançada somente após a oitava hora de aquecimento (283 °C), era atingida logo na primeira hora. Isto compromete completamente a remoção da água livre, pois, além da taxa de aquecimento ser superior a 50 °C por hora, não foi respeitado os patamares indicados pelo fabricante.

De acordo com o balanço energético da Tabela 6.5, esta elevação brusca de temperatura, em um curto espaço de tempo, equivale a uma quantidade de calor liberada onze vezes superior a recomendada pelo fabricante.

A consequência desta grande quantidade de energia, em apenas uma hora, além de ter envolvido gasto de gás desnecessário, foi responsável por uma explosão do refratário do fundo do cadinho (Figura 6.19), confirmando preocupações de Innocentini [35] referente a correta remoção da água existente. Esta explosão limitou-se apenas a danos ao refratário do fundo do cadinho, não oferecendo riscos às pessoas e ao equipamento envolvido na secagem. No entanto, este fato causou os seguintes prejuízos:

- Custo adicional de mão de obra para demolir e aplicar um novo refratário para o fundo;
- Custo adicional de material para uma nova aplicação de concreto;
- Aumento do grau de insatisfação da área operacional devido ao maior tempo de indisponibilidade do cadinho.

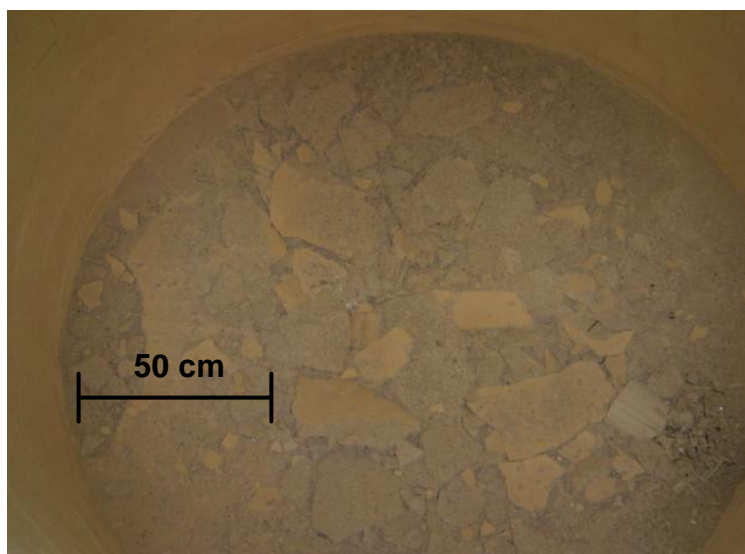


Figura 6.19 Detalhe do fundo do cadinho após a explosão do refratário

Diante dos graves problemas encontrados, foi solicitada intervenção da equipe de manutenção elétrica da empresa parceira deste trabalho, para efetuar os devidos ajustes necessários no sistema de aquecimento.

Após troca de algumas válvulas defeituosas, realização de vários ajustes (inclusive estequiométrico), redução do intervalo entre preventivas e revisão do procedimento de partida e monitoramento do pré-aquecimento, pode-se

observar, conforme Tabela 6.3 e Figura 6.20, um maior ajuste entre a curva programada e a real. No entanto, analisando o pré-aquecimento de vários outros cadinhos, observou-se que o sistema atual não conseguiu repetibilidade das curvas de aquecimento, porém testes práticos demonstraram que as taxas de aquecimento, apesar de serem superiores as indicadas pelo fabricante de refratário, não eram capazes de causar explosão do refratário ou comprometer significativamente a sua vida útil.

Tabela 6.3 Sumário do relatório de manutenção de cadinhos depois dos ajustes no pré-aquecedor [34].

Tempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Temperatura (real)	27	62	96	116	159	162	167	210	259	314	358	361	365	369	418	463	527	561	612	663	724	762	803	854	914	945	948
Temperatura (Programada)	27	50	100	100	150	150	150	200	250	300	350	350	350	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	950

Pré-aquecimento de cadinho

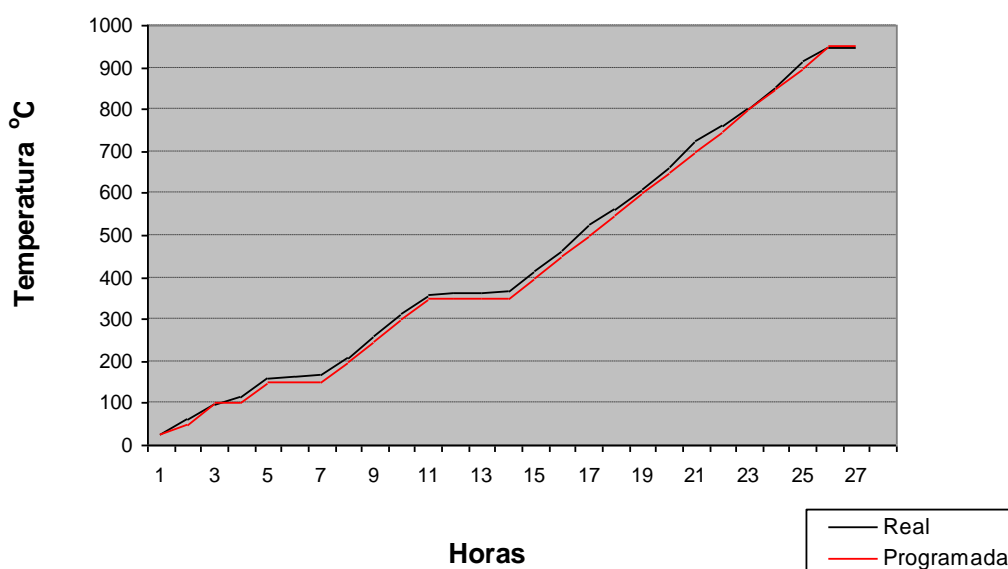


Figura 6.20 Ilustração do relatório de manutenção de cadinhos depois dos ajustes no pré-aquecedor [34]

Visando mostrar os efeitos térmicos antes e depois dos ajustes do sistema de pré-aquecimento, a seguir, na Tabela 6.4, tem-se um balanço de

energia (quantidade de calor absorvida pelo refratário) considerando a curva programada (sugerida pelo fabricante) e curvas antes e depois dos ajustes.

Considerando-se que $Q = m.c.\Delta t$ [11] temos:

- Q = quantidade de calor absorvida pelo refratário (Kcal)
- m = massa do refratário = 2853.60 kg
- c = calor específico = 0.24 kcal/kg °C
- ΔT = variação de temperatura (°C)

Tabela 6.4 Balanço energético de calor absorvido pelo refratário

Tempo Horas	Curvas de aquecimento			Quantidade de calor absorvida pelo refratário Kcal		
	Programada (°C)	Real antes dos ajustes (°C)	Real após ajustes (°C)	Curva Programada	Curva antes dos ajustes	Curva depois dos ajustes
0	27	27	27			
1	50	283	62	15752	175325	23970
2	100	365	96	34243	56159	23285
3	100	300	116	0	-44516	13697
4	150	336	159	34243	24655	29449
5	150	390	162	0	36983	2055
6	150	450	167	0	41092	3424
7	200	500	210	34243	34243	29449
8	250	545	259	34243	30819	33558
9	300	589	314	34243	30134	37668
10	350	635	358	34243	31504	30134
11	350	680	361	0	30819	2055
12	350	730	365	0	34243	2739
13	350	780	369	0	34243	2739
14	400	830	418	34243	34243	33558
15	450	835	463	34243	3424	30819
16	500	840	527	34243	3424	43831
17	550	880	561	34243	27395	23285
18	600	900	612	34243	13697	34928
19	650	905	663	34243	3424	34928
20	700	905	724	34243	0	41777
21	750	905	762	34243	0	26025
22	800	912	803	34243	4794	28079
23	850	915	854	34243	2055	34928
24	900	914	914	34243	-685	41092
25	950	915	945	34243	685	21231
26	950	916	948	0	685	2055
Total				632.129	608.844	630.760

É importante ressaltar que o cálculo do balanço energético envolveu apenas calor absorvido pelo refratário, pois, para se ter a quantidade total de energia despendida pelo queimador, deveria ser também contabilizada a

somatória das perdas pela carcaça, vedação entre a tampa e o cadinho, e dos gases de combustão que saem pelo duto de exaustão. Devido à complexidade envolvida nos cálculos destas perdas térmicas, a forma mais simples de se obter a energia total despendida pelo queimador foi multiplicar o consumo de gás pelo seu poder calorífico. Desta maneira, considerando o consumo de combustível obtido através do medidor de gás do pré-aquecedor e do valor do poder calorífero do gás GLP (108.90 Kcal/kg) fornecido pela distribuidora de gás, tem-se:

- Consumo de gás antes dos ajustes = 922 kg
 - Energia total fornecida pelo queimador = 10.040.580 kcal
- Consumo de gás após os ajustes = 474 kg
 - Energia total fornecida pelo queimador = 5.161.860 Kcal
- Redução do consumo de gás (48,5%) = 448 kg

De posse destes valores, dividindo-se a quantidade de calor necessária absorvida pelo refratário (Kcal) pela energia total fornecida pelo queimador (Kcal), obtêm-se uma eficiência térmica do queimador de 6% (antes dos ajustes) e 12% (depois dos ajustes). Este aumento de eficiência resultou em uma economia de R\$ 861,49 (48,5%) por secagem, conforme pode ser verificado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 Sumário dos custos de secagem antes e depois dos ajustes.

Consumo de gás Antes dos ajustes	Consumo de gás Após os ajustes	Custo pago por kg de gás GLP	Custo da secagem Antes dos ajustes	Custo da secagem Depois dos ajustes	Economia por secagem
922 kg	474 kg	R\$ 1,92	R\$ 1773,00	R\$ 911,51	R\$ 861,49

Apesar de baixa, a eficiência conseguida está dentro do esperado para queimadores com mais de 20 anos de funcionamento, em que a eficiência térmica é de 5 a 15 % [38]. É importante ressaltar que inclusive os mais modernos pré-aquecedores apresentam também, em menor escala é claro, deficiência no controle de fluxo de temperatura, assim como a eficiência

máxima dos queimadores é de 35% [38]. Além destas dificuldades o pré-aquecimento a gás apresenta os seguintes problemas inerentes [37, 38]:

- Perda de calor e poluição do ar produzida pela exaustão dos gases.
- Risco de explosão de gás inflamável durante o aquecimento.
- Desgaste do refratário por choque térmico devido a oscilações bruscas de temperatura e incidência direta da chama.
- Aumento do nível de ruído do ambiente, devido ao volume de gás que sai dos jatos dos queimadores.
- Possibilidade de contaminação do refratário e do alumínio devido aos produtos de combustão.

Diante de todas estas desvantagens apresentadas pelo sistema a gás e considerando o custo diferenciado de energia elétrica que a empresa parceira possui, justificou-se a utilização de uma matriz de decisão para avaliação de duas hipóteses:

- Implantar melhorias no sistema de aquecimento atual.
- Instalação de um pré-aquecedor elétrico.

Para dar maior respaldo na decisão, tornava-se também necessário o conhecimento do funcionamento de um pré-aquecedor elétrico.

6.3.4.2 Pré-aquecimento elétrico

Um aquecedor elétrico é um aparelho que converte energia elétrica em calor. O elemento de aquecimento no interior de cada aquecedor elétrico é simplesmente uma resistência elétrica que trabalha com o princípio do efeito Joule. Este fenômeno ocorre devido ao encontro dos elétrons da corrente elétrica com as partículas do condutor, estas colisões fazem com que parte da energia cinética dos elétrons seja transferida para o átomo, aumentando com

isto seu estado de excitação e, conseqüentemente, sua temperatura [41]. Assim, a energia elétrica é transformada em energia térmica (calor).

A quantidade de calor liberada pela passagem de corrente elétrica pode ser calculada pela aplicação da primeira lei da termodinâmica, também chamada de lei da conservação de energia, onde afirma que a energia pode ser transformada de uma forma para outra, mas não pode ser criada ou destruída [42, 43].

Neste contexto, o pré-aquecedor elétrico, utilizado para aquecimento de cadinho, é composto por uma associação de resistores devidamente calculada para promover a dissipação térmica necessária para pré-aquecer o refratário de acordo com as orientações do fabricante. Geralmente, estes resistores são montados em um tampa metálica móvel revestida com refratário, que é colocada sobre o cadinho, conforme pode ser ilustrado nas Figuras 6.21 e 6.22 [44]:



Figura 6.21 Ilustração de uma tampa antes de colocar sobre um cadinho



Figura 6.22 Ilustração de várias tampas resistentes instaladas sobre cadinhos

Aproveitando os cálculos de balanço energético da Tabela 6.5, buscou-se conhecer qual seria o custo caso a secagem fosse efetuada por um pré-aquecedor elétrico. Para isso foram consideradas as seguintes informações:

- O calor absorvido pelo refratário (632.129 kcal), que é equivalente a 0,74 mW*h (mega watt * hora)
- Custo pago por mega watt * hora igual a R\$ 73,92

Por meio da Tabela 6.6 é possível verificar que o custo por secagem utilizando energia elétrica é de R\$ 78,36, o que equivale a uma redução de custo de 91% quando comparado com o sistema a gás.

Tabela 6.6 Sumário do custo de secagem utilizando energia elétrica

Consumo elétrico Teórico	Eficiência	Consumo elétrico Real	Custo do mW	Custo por secagem
0,74 mW	0,70 %	1.06 mW	R\$ 73,92	R\$ 78,36

Além de um menor custo por secagem do refratário, a utilização do pré-aquecedor elétrico apresenta as seguintes vantagens [37,38]:

- Eliminação do risco de explosão causado pelo gás inflamável;
- Melhor e mais eficiente/confiável controle de temperatura;
- Redução de oscilações bruscas de temperatura, redução no desgaste do refratário;
- Eliminação do desgaste de refratário causado por incidência direta de chama sobre ele;
- Eliminação do barulho causado geralmente por queimadores;

De posse das informações básicas dos sistemas de aquecimento elétrico e a gás, tornou-se possível a utilização de uma matriz de decisão para direcionamento do que deveria ser feito para melhoria da secagem de refratários em cadinhos.

6.3.4.3 Matriz de decisão para definição do sistema de aquecimento

a-) Hipótese 01 – Implantar melhorias no pré-aquecedor a gás

- **Prós**
 - Aproveitamento do pré-aquecedor existente;
 - Não haveria necessidade de novas instalações;
 - Redução do desgaste do refratário, pois, com a implantação das melhorias, seria possível um controle mais eficiente de temperatura;
 - Monitoramento on-line da secagem.
- **Contras**
 - Necessidade de várias adaptações para tornar o equipamento mais confiável e seguro;

- Risco de explosão de gás, apesar de bastante reduzido, ainda continuaria existindo;
- Ruído excessivo causado pelo queimador e sopradores de ar.
- Eficiência energética inferior ao aquecedor elétrico;
- Custo de secagem nove vezes superior ao pré-aquecedor elétrico;
- Possibilidade de contaminação do refratário e do alumínio devido aos produtos de combustão;
- Poluição do ar produzida pela exaustão dos gases.

b-) Hipótese 02 – Instalação de um pré-aquecedor elétrico

- **Prós**

- Eficiência energética superior ao aquecedor a gás;
- Custo de secagem 91 % inferior ao pré-aquecedor a gás;
- Alta confiabilidade no controle de temperatura;
- Eliminação da poluição causada pelos gases de combustão;
- Eliminação do ruído causado por queimadores;
- Aproveitamento da instalação predial existente;
- Custo de implantação inferior ao sistema a gás;
- Monitoramento on-line da secagem.

- **Contras**

- Não haverá aproveitamento do equipamento atual;
- Necessidade de novas instalações elétricas e novos equipamentos;
- Aumento do custo de manutenção anual devido à troca de resistores;
- Necessidade de treinamento para operadores do equipamento e equipe de manutenção.

Após análise de custo (Tabela 6.7) e benefício, baseado nos prós e

contra da matriz de decisão, a empresa parceira deste trabalho aprovou a compra e instalação de um pré-aquecedor elétrico, valorizando este trabalho. Com a implantação deste sistema, busca-se eliminar mais um ponto de falha, que é a secagem incorreta do refratário.

Tabela 6.7 Comparativo de custo dos sistemas de aquecimento a gás e elétrico

Quant. Anual	Custo unitário		Custo total Anual		Custo de manutenção Anual		Custo total anual	
	Secagem Pré-aquecedor a gás	Secagem Pré-aquecedor elétrico	Secagem Pré-aquecedor a gás	Secagem Pré-aquecedor elétrico	Pré- aquecedor a gás	Pré- aquecedor elétrico	Pré- aquecedor a gás	Pré- aquecedor elétrico
28	R\$ 861,49	R\$ 73,92	R\$ 24.121,72	R\$ 2.069,76	R\$ 1100,00	R\$ 5.000,00	R\$ 24.221,72	R\$ 7.069,76

6.3.5 Avaliação da vida útil do refratário

Uma vez implantadas as melhorias na aplicação/troca do refratário e no seu sistema de pré-aquecimento, escolheu-se aleatoriamente 03 cadinhos para monitoramento, por meio de inspeções termográficas, até o final de vida útil, quando inspeções post mortem foram realizadas para verificação dos mecanismos de desgaste do refratário.

6.3.5.1 Inspeções termográficas

Os cadinhos escolhidos para terem monitoramento da vida útil após implantação das melhorias anteriormente citadas foram os de número 3, 7 e 10. Estas inspeções/medições de evolução de temperatura da carcaça começaram logo após o respectivo cadinho sair de manutenção e entrar em operação. As medições repetiram-se a princípio quinzenalmente, depois semanalmente e por fim diariamente até chegar à temperatura de avermelhamento da carcaça, quando o cadinho foi parado emergencialmente para manutenção. Visando padronização, todos os pontos de monitoramento

foram marcados em alto-relevo em cada cadinho, por meio de pontos de solda elétrica, de acordo com a Figura 6.23.

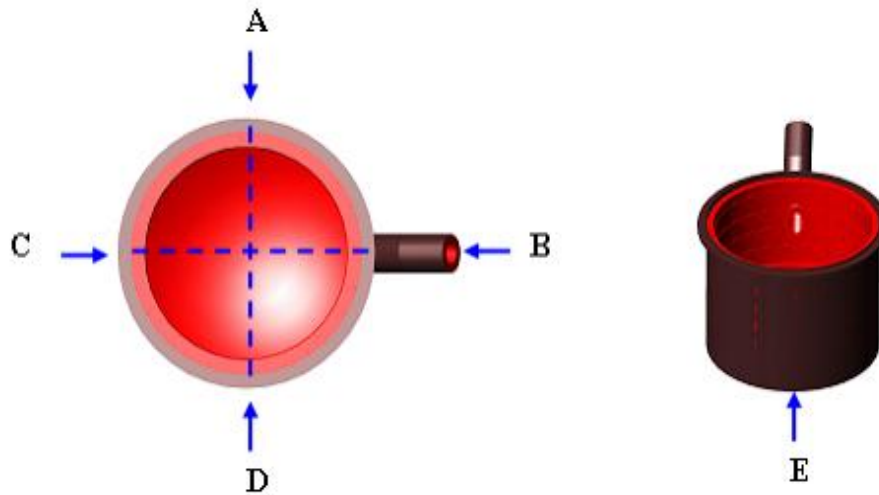


Figura 6.23 Detalhe dos pontos do cadinho para inspeção termográfica

Com este monitoramento foi possível descobrir qual a temperatura máxima de carcaça que o cadinho poderia ser utilizado, sem comprometimento da integridade da chaparia e a segurança dos operadores de corrida de metal. Um exemplo da evolução do acompanhamento termográfico pode ser observado no cadinho 3, por meio das Figuras 6.24, 6.25, 6.26, 6.27, 6.28.

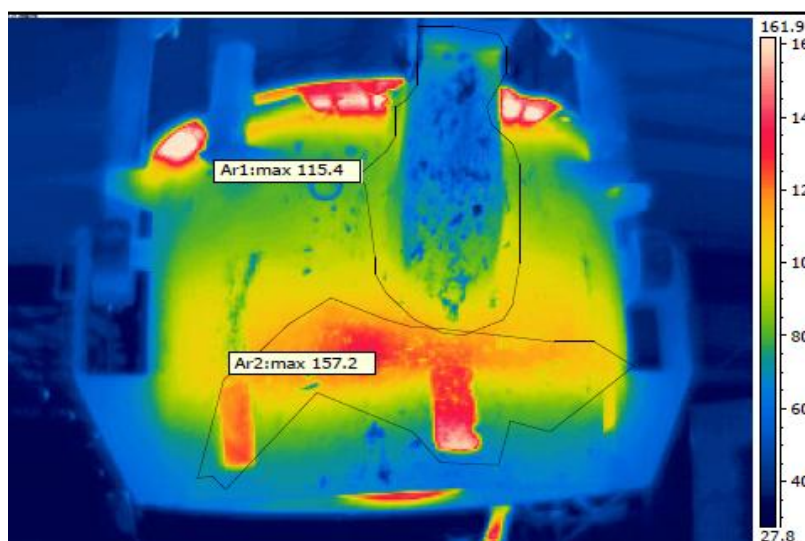


Figura 6.24 Termografia do ponto B após 03 corridas de metal (temp. máx = 161.9 °C)

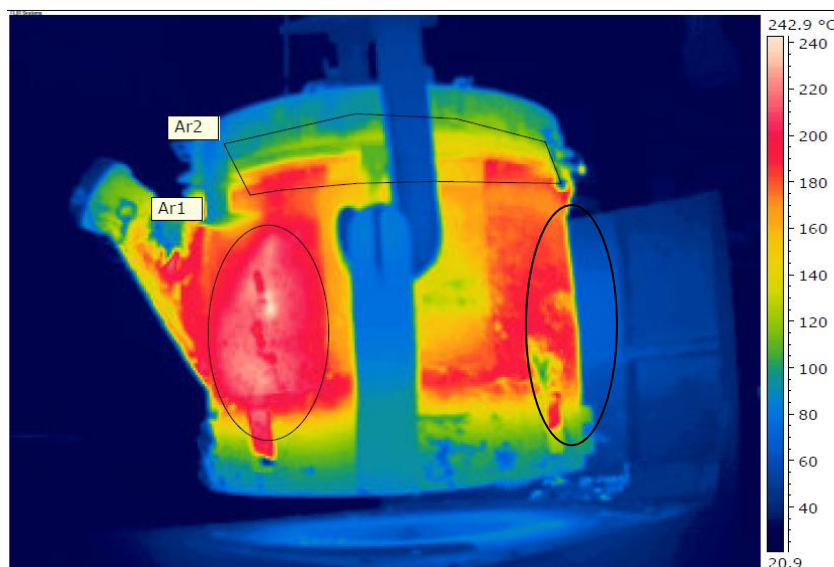


Figura 6.25 Termografia do ponto A após 290 corridas de metal (temp. máx = 242 °C)

Por meio da Figura 6.25 é possível observar que ao redor do bico (ponto B) do cadinho e próximo ao ponto D são as que regiões que apresentam maior desgaste do refratário. As observações de campo detectaram que estas regiões são os locais onde a ferramenta de limpeza (raspador) atua com maior frequência, sendo assim uma provável justificativa para o maior aquecimento inicial de carcaça.

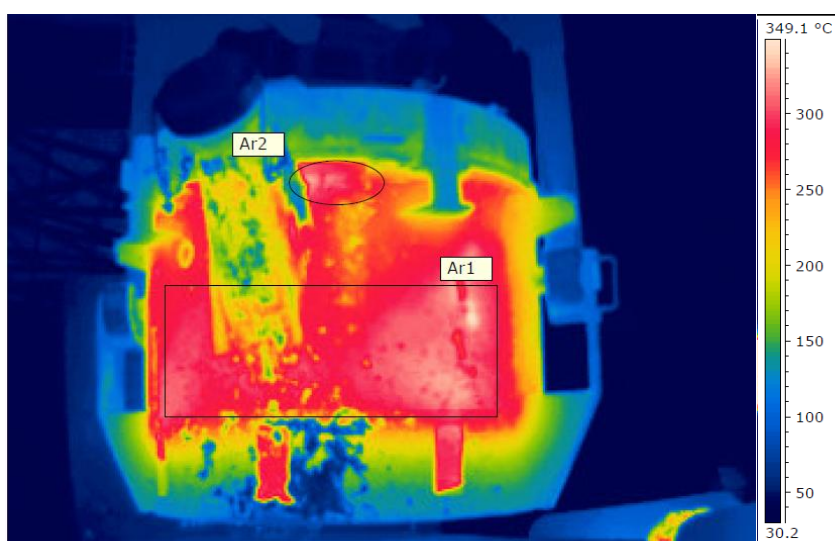


Figura 6.26: Termografia do ponto B após 425 corridas de metal (temp. máx = 349 °C)

Novamente observa-se na Figura 6.26 que o desgaste em torno do bico é progressivo, isto provavelmente agravou-se pelo acúmulo de banho em torno desta região, fazendo com que seja necessária uma maior incidência do equipamento de limpeza (raspador) para conseguir remover o material impregnado.

Outra área que, de acordo com a Figura 6.27 demonstra forte desgaste, é o ponto E (fundo). A causa provável do aumento de temperatura da carcaça deve ser novamente a limpeza. Esta suspeita se deve ao fato da necessidade de utilização de martelo ao invés de raspador. A troca de ferramenta se faz necessária devido à ineficácia da raspagem para tirar banho impregnado no fundo, principalmente quando a temperatura de limpeza encontra-se abaixo de 400 °C.

O aumento gradativo do desgaste do refratário do fundo, conforme demonstrado nas Figuras 6.27 e 6.28 evolui até ao ponto de avermelhamento da carcaça (546,7 °C), conforme pode ser verificado na Figura 6.28. Neste estágio, chega-se ao final da medição termográfica neste cadinho, pois se alcançou a vida útil do refratário. Considerando-se, assim, que a partir da temperatura de avermelhamento o risco de vazamento de metal era iminente, uma vez que poderia colocar em risco a integridade do cadinho e dos operadores de corrida, justificou-se então uma intervenção imediata da equipe de manutenção.

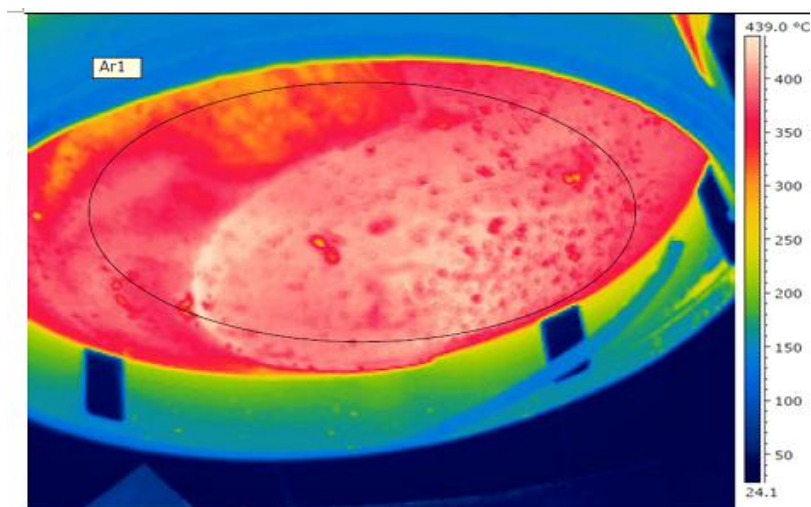


Figura 6.27 Termografia do ponto E após 545 corridas de metal (temp. máx = 439 °C)

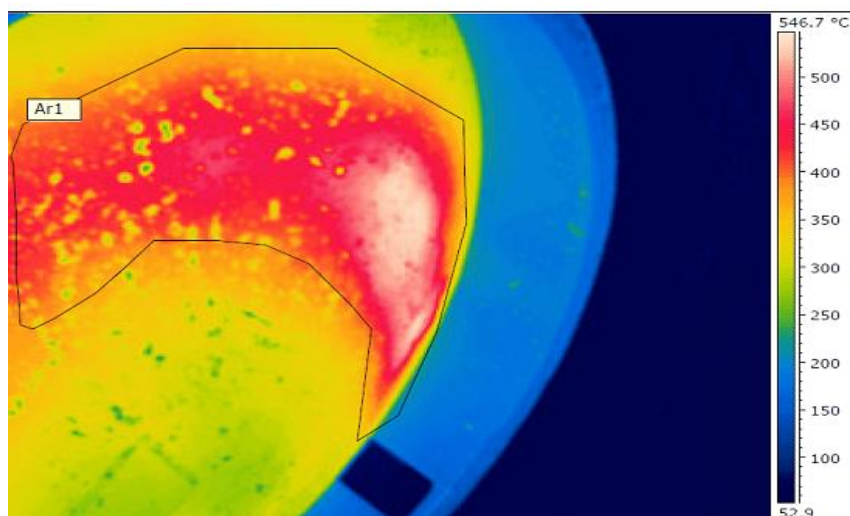


Figura 6.28 Termografia do ponto E após 669 corridas de metal (temp. máx = 546.7 °C)

Com o acompanhamento termográfico, por seis meses, dos três cadinhos selecionados foi possível a obtenção das seguintes informações:

- Temperatura de avermelhamento da carcaça metálica do cadinho (546 °C);
- A espessura mínima do refratário para que ocorra avermelhamento (45% da espessura original do refratário);
- Número de corridas executadas até o avermelhamento de carcaça metálica (669 corridas).

De posse destas informações, juntamente com a experiência prática do autor deste trabalho, foi possível montar um critério de análise dos resultados da termografia (Tabela 6.8), em que foram estabelecidos os riscos (baixo, médio, alto e crítico) e as ações que deveriam ser tomadas para cada intervalo de temperatura. Este critério teve como premissa básica utilizar o máximo possível da vida útil do refratário, sem comprometer a integridade do cadinho e a segurança de seus operadores. Por meio de diversas medições realizadas, observou-se que em alguns casos a chaparia metálica começava a ter uma leve deformação a partir de 460 °C. Desta maneira utilizou-se esta temperatura

como limitador de vida útil do cadinho, ao invés da temperatura de 546 °C.

Tabela 6.8 Critério de medições termográficas para acompanhamento de vida útil do refratário de cadinho

Risco	Temperatura (° C)		Ação
	de	até	
Baixo	100	300	- Aguardar manutenção preventiva - Efetuar termografia mensal
Médio	301	400	- Aguardar manutenção preventiva - Efetuar termografia semanal
Alto	401	460	Efetuar termografia a cada 02 dias
Crítico	Acima de 460		Parar imediatamente o cadinho para manutenção

6.3.5.2 Análise post mortem

A análise post mortem foi realizada nos três cadinhos que tiveram acompanhamento termográfico da evolução de temperatura da carcaça metálica. Na Tabela 6.9 pode-se observar o número de corridas realizadas por cada um deles e o motivo da falha que levou o cadinho para manutenção corretiva.

Tabela 6.9 - Relação de cadinhos para análise post mortem

Nº do cadinho	Número de corridas	Motivo da falha
3	669	Avermelhamento da estrutura metálica do fundo do cadinho
7	534	Avermelhamento da estrutura metálica do bico do cadinho
10	514	Avermelhamento da estrutura metálica do bico do cadinho

Após o esfriamento do revestimento do cadinho, por perda natural de temperatura, foram retirados manualmente com auxílio de marteletes pneumáticos os resquícios de banho e metal sobre o refratário. Em seguida

iniciou-se a análise post mortem do refratário, seguindo os seguintes passos:

- Inspeção visual de toda área revestida.
- Verificação da presença de trincas e infiltração de metal
- Identificação do local onde houve avermelhamento da carcaça.
- Mapeamento do cadinho, dividindo-o em oito pontos conforme pode ser observado na Figura 6.29, onde:
 - Pontos A, B, C, D, E, foram utilizados para verificação da espessura remanescente da parede. A cota vertical utilizada foi equivalente a 50 cm da sua altura.
 - O ponto H (centro do fundo) foi utilizado para medição de espessura do concreto refratário do fundo do cadinho.
 - Pontos F e G foram utilizados para verificação de infiltração de metal, logo sua localização encontrava-se na interface da borda metálica e parede refratária.

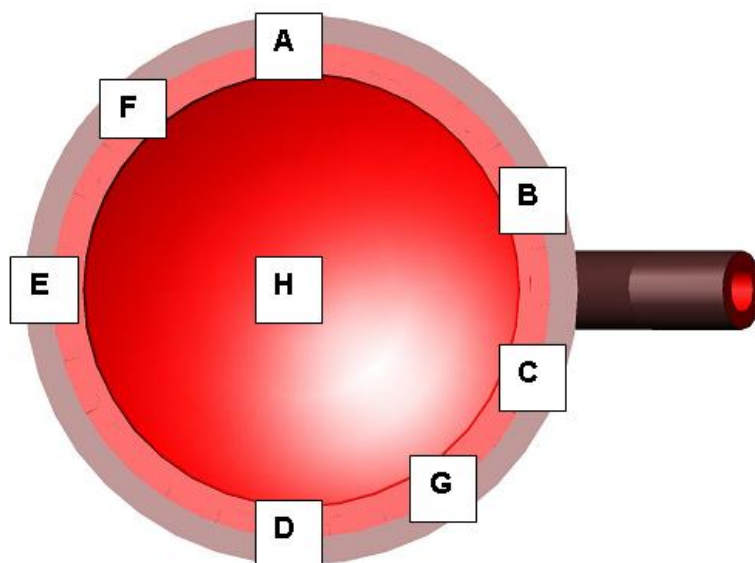


Figura 6.29 Detalhe dos locais de inspeção do cadinho

A análise post mortem teve duração de aproximadamente oito horas por cadinho. Todas as evidências foram anotadas e registradas por meio de fotos, visando identificar as regiões mais vulneráveis no revestimento, assim como quais foram os mecanismos de desgaste atuantes. A seguir encontra-se um

sumário das informações obtidas, que visam contribuir para o entendimento do que está limitando atualmente a vida útil do cadinho e quais são os gargalos que precisam ser eliminados.

6.3.5.2.1 Avermelhamento da estrutura metálica do cadinho

Analisando internamente os cadinhos verificou-se que, enquanto no cadinho 3 ocorreu um desgaste natural do refratário do fundo, nos cadinhos 7 e 10, a causa provável do avermelhamento da carcaça metálica na região do bico foi devido ao desprendimento do concreto refratário. Na Figura 6.30 tem-se um exemplo do ocorrido no cadinho 10, onde dois pontos próximos ao bico foram encontrados sem refratário e com a chaparia exposta.

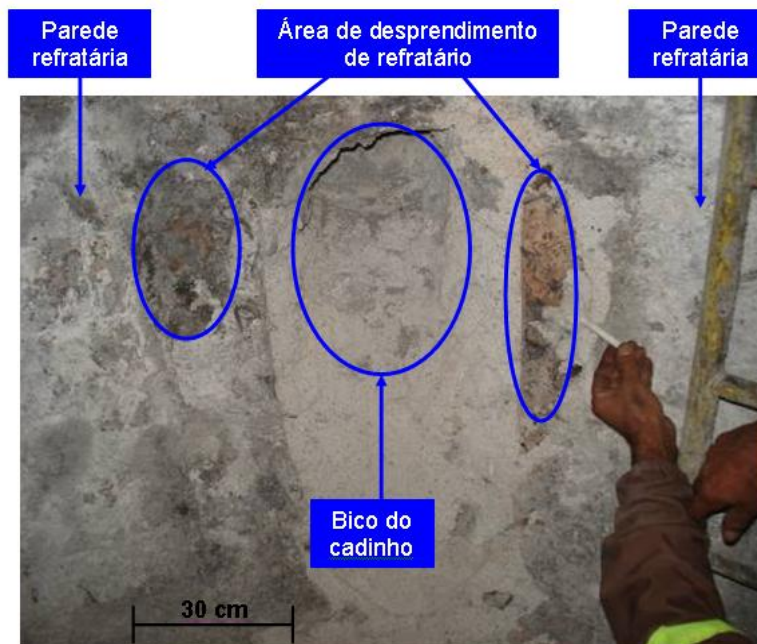


Figura 6.30 Detalhe interno dos cadinhos 7 e 10 mostrando desprendimento de refratário e exposição da chapa metálica

Analisando as possíveis causas do desprendimento do refratário, pode-se verificar que esta região é mais frágil que o restante do cadinho, por dois

motivos:

- Existência de um concentrador de tensão formado pelo ângulo de 90° existente entre a parede e o bico.
- Nesta região ocorre o encontro do concreto refratário com o tijolo, facilitando com isto o desprendimento do concreto durante a limpeza devido a sua menor resistência mecânica e a erosão, quando comparado com o tijolo.

A fragilidade da área do bico torna o processo de limpeza uma tarefa ainda mais crítica, principalmente quando há acúmulo de banho eletrolítico nesta região, pois, além de seu esfriamento ser mais rápido que o alumínio, o banho também é mais duro. Estes dois fatos exigem uma maior potência da máquina de limpeza, reduzindo com isto a sensibilidade do seu operador e conseqüentemente aumentando as chances de arrancamento de refratário ao redor do bico, conforme pode ser demonstrado na Figura 6.31.

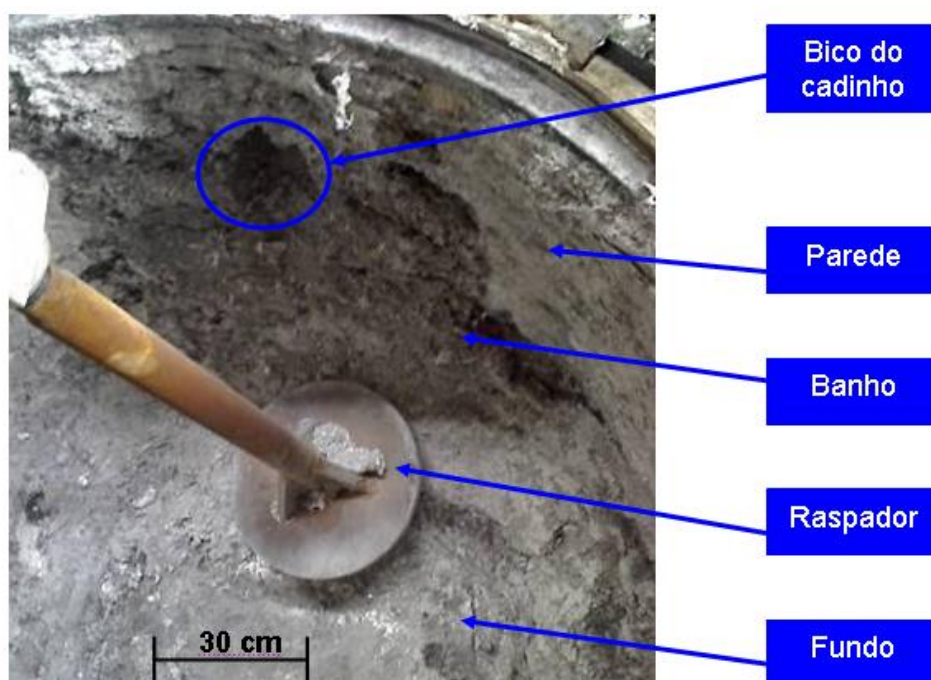


Figura 6.31 Limpeza de cadinho na região do bico

6.3.5.2.2 Espessura do refratário

Analisando o refratário remanescente nos pontos A, B, C, D, E, H conforme ilustrado na Figura 6.30 pode-se concluir que:

- Os pontos correspondentes a parede (A, B, C, D, E) apresentavam sinais de desgaste por atrito, confirmando a ação abrasiva do equipamento de limpeza (raspador);
- O ponto correspondente ao fundo (H) apresentava sinais de erosão e afundamento, provavelmente causados respectivamente pelo efeito do sifonamento de metal no fundo do cadinho e pelo uso de martetele hidráulico acoplado na retroescavadeira para remoção de banho desta região.

Os resultados dos desgastes do refratário refletiram-se nas reduções de espessuras demonstradas na Tabela 6.10:

Tabela 6.10 Porcentagem de redução de espessura do refratário

Nº do cadinho	% Redução de espessura	
	Parede	Fundo
3	41 a 57	61
7	35 a 67	67
10	40 a 65	60
Média	39 a 63	63

6.3.5.2.3 Infiltração de metal entre a borda e a parede refratária

A análise da existência de infiltração de metal entre a borda metálica e a parede refratária foi feita checando os pontos F e G (Figura 6.29). Por meio

destes pontos observou-se (Figura 32) a ocorrência de fina (0,10 mm x 60 mm) camada de infiltração de metal, provavelmente devido à deficiência de selagem (em torno de 25 mm) da massa plástica colocada entre a última fiada de tijolo e a borda metálica. Apesar da existência, esta finíssima camada de infiltração de metal não demonstrou ser uma fonte de preocupação, pois não comprometeu a chaparia e nem foi a causa da parada cadinho para manutenção.

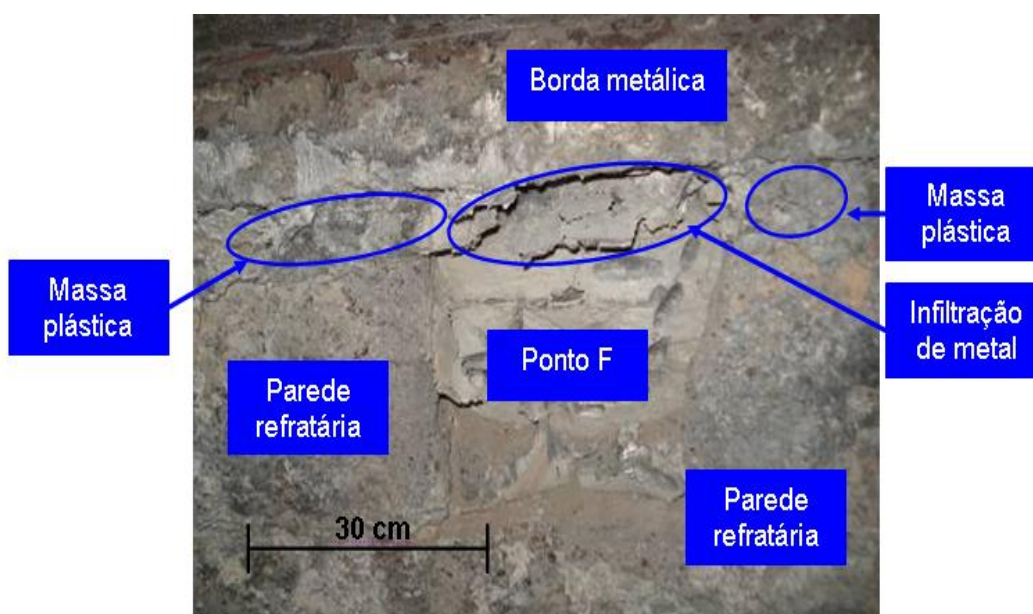


Figura 6.32 Detalhe da interface parede refratária e borda metálica do cadinho

6.3.5.2.4 Avaliação da análise post mortem

A análise post mortem do cadinho mostra claramente que a maior causa do desgaste do refratário é a solicitação que ocorre durante a limpeza. Sendo assim, esta tarefa tem influência direta na vida útil do cadinho, pois quanto mais difícil for para ser realizada, maior será o desgaste do refratário. No entanto, como a compra de uma máquina automática conforme Figuras 6.6 e 6.7, não fez parte da estratégia de investimentos da empresa parceira deste trabalho, restou apenas melhorar o desempenho do refratário. Para que isto seja feito deu-se foco nos seguintes gargalos:

- A resistência mecânica e a erosão do concreto refratário, aplicado na região entre o bico e a parede do cadinho, precisam ser aumentadas.
- Aumentar a resistência mecânica ao impacto e a erosão do concreto aplicado no fundo do cadinho.
- Necessita-se de um tijolo com maior resistência a erosão.
- Todos estes aspectos devem ser melhorados sem comprometimento dos aspectos químicos.

Apesar de não ter sido detectadas trincas significativas na análise post mortem, os efeitos do choque térmico não podem ser esquecidos, devido à grande ciclagem térmica sofrida pelos cadinhos.

6.3.5.3 Avaliação dos resultados obtidos após implantação de melhorias

Para avaliação da eficácia das ações implantadas foram considerados dois períodos: seis meses antes e seis meses após as melhorias implantadas. É importante ressaltar que a substituição do sistema de aquecimento a gás pelo elétrico ocorreu após os seis meses de testes, logo as suas vantagens não entraram no comparativo de desempenho do refratário.

Neste contexto, na Tabela 6.11 é possível verificar o resultado do comparativo de vida útil de refratários. Pode-se observar que, apesar da taxa de pré-aquecimento ainda não ter sido a ideal, devido à limitação do pré-aquecedor a gás, verificou-se uma melhora significativa na vida útil do refratário, conforme pode ser visto a seguir:

- Vida útil do refratário aumentou em média 83%;
- 91% dos cadinhos conseguiram transportar mais de 400 corridas, antes da implantação das melhorias este número era de apenas 9%.
- 73% dos cadinhos (nove no total) tiveram vida útil acima de 500 corridas, antes das melhorias o número máximo era de 467.

O número de corridas máximo executado por um cadinho subiu 53% (de 467 para 715 corridas).

Tabela 6.11 Sumário do relatório de manutenção de cadinhos depois dos ajustes [34].

Nº do cadinho	Número de corridas		% Aumento de vida útil
	Antes das melhorias	Depois das melhorias	
1	303	514	70
2	195	523	168
3	265	669	152
5	261	609	133
6	360	568	58
7	366	534	46
9	213	446	109
10	467	514	10
11	329	715	117
12	355	652	84
13	198	301	52
Média	301	550	83

O reflexo do aumento de vida útil do refratário é demonstrado na Tabela 6.12, por meio de ganhos financeiros.

Tabela 6.12 Demonstrativo de ganhos financeiros da 1ª. etapa de melhorias.

Custo anual de manutenção		Custo anual de Secagem		Custo total anual		Redução de custo anual Após melhorias
Antes das melhorias	Depois das melhorias	Antes dos ajustes	Depois dos ajustes	Antes das melhorias	Depois das melhorias	
R\$ 294.640,00	R\$ 177.828,00	R\$ 52.789,40	R\$ 7.069,76	R\$ 347.429,40	R\$ 184.897,76	R\$ 162.531,64

O resultado destas melhorias, além de terem reduzido em 47% o custo anual com manutenção e secagem do refratário, foram responsáveis pelos seguintes benefícios adicionais:

- Aumento da disponibilidade de cadinho, permitindo que sejam retirados quatro cadinhos de operação sem que seja comprometido o transporte de metal.
- Aumento do grau de satisfação da área responsável pela operação de cadinhos.
- Redução de 99% dos reparos realizados fora do horário administrativo, devido a paradas emergências de cadinhos.

Os benefícios obtidos, nesta primeira etapa, com ações de melhoria na manutenção de refratário e no sistema de aquecimento, deram sustentação para este trabalho e reforçaram a motivação que melhores resultados ainda estão por vir com a aplicação de materiais refratários de melhor desempenho.

No entanto, não pode ser esquecido que, durante o desenvolvimento de novos materiais, seja dada a devida atenção para redução da temperatura de carcaça do cadinho, principalmente após a primeira metade de vida útil do refratário. A redução da temperatura externa do cadinho visa amenizar os efeitos da alta temperatura para os operadores de corrida e para a sua chaparia.

6.4 Segunda etapa de melhorias

A implantação da segunda etapa de melhorias deste trabalho só foi possível após a resolução dos problemas existentes em todo processo de limpeza, manutenção e secagem do refratário do cadinho. Este primeiro passo foi de fundamental importância para que fosse garantido o real aproveitamento da vida útil do atual refratário. Sendo assim a 2ª etapa de melhorias esta sustentada nos seguintes pilares:

- Conhecimento prático e teórico adquirido pelo autor deste trabalho durante o entendimento do processo como um todo e a implantação e monitoramento da 1ª etapa de melhorias;

- Implantação da manutenção preventiva baseada em laudos preditivos realizados por meio de inspeções termográficas;
- Qualificação da equipe de manutenção de refratário dentro dos requisitos exigidos pela literatura e por meio das orientações do fabricante de cada material aplicado;
- Concretagem do fundo de maneira correta;
- Curva de secagem do refratário de acordo com a estabelecida pelo fabricante;
- Redução do número de cadinhos limpos a frio.

Por meio de todo aprendizado adquirido na primeira etapa deste trabalho, tornou-se possível entender a importância de cada propriedade do material refratário. Baseado na leitura das normas ASTM, ISO, DIN e no acompanhamento de medições em laboratórios, foi possível entender como cada propriedade é avaliada. Desta maneira, com a somatória de conhecimentos adquiridos por este autor, baseando-se numa visão sistêmica, foi possível selecionar e classificar as seguintes propriedades que devem ter seu desempenho melhorado:

- Propriedades físicas:
 - Resistência a erosão.
 - Resistência mecânica a quente

Com a melhoria do desempenho das propriedades físicas espera-se menor dano nas etapas de limpeza.

- Propriedades térmicas:
 - Resistência ao choque térmico
 - Aumento da resistência ao choque térmico via seleção de materiais com menor coeficiente de expansão, já que o aumento da condutividade térmica levaria ao aumento da temperatura da chapa metálica e traria maior desconforto

aos operadores, além da perda de calor.

- Propriedades químicas:
 - Manutenção das propriedades e desempenho atual já que a corrosão não foi o aspecto determinante da causa da parada do cadinho.

Uma vez definido as propriedades mais relevantes, após a análise post mortem, procurou-se verificar os atuais valores nos materiais empregados no bico, fundo e parede. No entanto, conforme pode ser verificado na Tabela 6.13, algumas das propriedades que precisam ter seu desempenho melhorado, não constam nas fichas técnicas dos atuais materiais refratários. Desta maneira, para que sejam atendidos os requisitos mínimos para qualificação e seleção de materiais refratários, deverá ser solicitado aos atuais fornecedores destes materiais os respectivos valores de ensaios laboratoriais das propriedades faltantes.

Tabela 6.13 Sumário da ficha técnica dos atuais refratários utilizados nos cadinhos.

Tipo de refratário	Composição química						Propriedades						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O	outros	Densidade (g/cm ³)	RFTA (MPa)	RCTA (MPa)	PA (%)	CT (W/m.k)	RA (cm ³)	Variação Dimensional (%)
Tijolo (parede)	60,5	34,5	0,9	2,4	1,4	0,1	2,44	11	80	18	1,44	15	0,4
Concreto fundo e bico	57,5	36	1,5	1,2	----	3,6	2,48	6,4	25,9	17,3	1,69	< 7	- 0,2

Legenda:

- RFTA = Resistência a flexão a frio após queima a 800° C
 RCTA = Resistência a compressão a frio após queima a 800° C
 PA = Porosidade aparente a 1000° C
 RA = Resistência a abrasão após queima a 800° C
 CT = Condutividade térmica a 800° C

7 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou como os conhecimentos adquiridos pelo engenheiro de materiais conseguem ajudar a entender, interagir e propor soluções em um processo industrial. Verificou-se que o acompanhamento industrial de uma forma sistemática e sistêmica permite a visualização de fatos não detectáveis por teoria ou simulações. Desta maneira, pode-se constatar que a resolução de um problema, a partir do método científico, aliando a teoria à prática operacional traz contribuições não somente às empresas, mas também ao meio acadêmico. Baseando-se nesses argumentos, foi evidenciado que a melhoria de desempenho de um refratário de cadinho começa pelo ajuste do processo como um todo. Logo, antes que se qualifique um novo material, é necessário obter o máximo de vida útil do material que está sendo utilizado. Resultados da coleta de informações possibilitaram a compreensão das limitações da vida útil do refratário e permitiram a definição das oportunidades de melhoria no processo, das quais pode-se citar o processo de limpeza, a pouca qualificação dos aplicadores de refratário, a concretagem inadequada do fundo e o sistema de secagem deficiente.

A primeira etapa de melhoria deste projeto, que consistiu na minimização dos mecanismos de desgaste do refratário, possibilitou a implantação de uma manutenção planejada baseada em informações preditivas, ao invés de somente atuar corretivamente de forma descontrolada e sem nenhum planejamento prévio. A qualificação adequada da mão de obra e a criação de um procedimento de aplicação de refratário foram de fundamental importância para eliminar as falhas ocorridas na aplicação do refratário. Outras ações que contribuíram significativamente para a melhoria do processo como um todo foram: a mudança do procedimento de concretagem do fundo do cadinho e os ajustes no sistema de pré-aquecimento do refratário. A utilização de formas no fundo permitiu uma quebra de um paradigma de 30 anos, pois, por todo este período foi socado um concreto que era desenvolvido para ser vibrado. A realização de ajustes no sistema de aquecimento fez com que o autor deste projeto aprofundasse seu conhecimento em combustão. No

entanto, além de melhorar a confiabilidade do sistema de aquecimento a gás, este trabalho contribuiu para elaboração de uma matriz de decisão que justificou a substituição do atual sistema de aquecimento a gás por um sistema de aquecimento elétrico.

O monitoramento da vida útil do cadinho, por meio de inspeções termográficas, permitiu acompanhar a evolução da vida útil do refratário por meio da evolução de temperatura de sua carcaça metálica. Desta maneira a termografia tornou-se uma importante ferramenta para garantir que seja aproveitado o máximo de vida útil do refratário, sem colocar em risco o equipamento e seus operadores. Entretanto, as altas temperaturas da carcaça, principalmente após a metade da vida útil, além de reduzirem a temperatura do metal, proporcionam desconforto térmico aos operadores, demonstrando com isto a necessidade de um revestimento refratário mais isolante ou mais duradouro, ou práticas de limpeza que não danifiquem tanto o refratário.

A análise post mortem sinalizou que os gargalos que ainda reduzem a vida útil dos refratários são a necessidade de aumento da resistência mecânica a flexão a quente, à erosão e ao impacto. A resistência ao choque térmico também precisa ser melhorada devido a grande ciclagem térmica que sofre o cadinho.

O sucesso deste trabalho pode ser medido na avaliação dos resultados da primeira etapa de melhoria, em que se verificou um aumento de 83% na vida útil do refratário, fazendo com que a média do número de corridas aumentasse de 301 para 550. Esta melhoria no desempenho do refratário proporcionou uma redução de 47 % (R\$ 162.531,64) no custo de manutenção e secagem do revestimento do cadinho.

A segunda etapa de melhoria deste trabalho está sustentada no aprendizado obtido. Este fato levou ao entendimento da importância de cada propriedade do material refratário. Desta maneira, com a somatória de conhecimentos adquiridos por este autor, baseando-se numa visão sistêmica, foi possível selecionar e classificar as propriedades que devem ter seu desempenho melhorado. No entanto, para que isto ocorra, é necessário, conforme Figura 7.1, um sinergismo entre projeto, material aplicado, instalação,

tratamento térmico, operação e inspeção periódica. A conjunção destes tópicos sustenta a análise sistêmica para revestimento refratário de cadinhos, realizada neste trabalho.

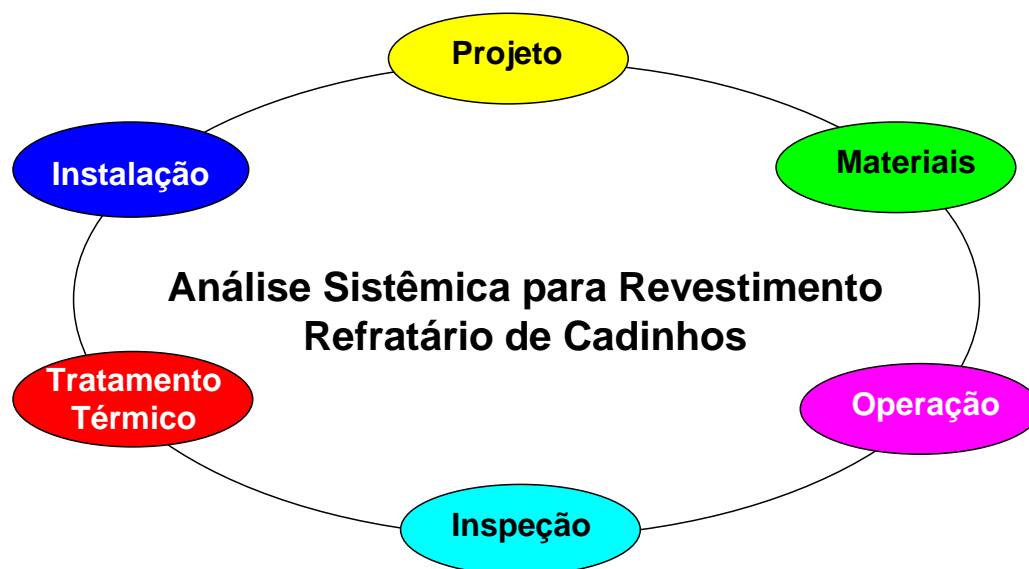


Figura 7.1 Tópicos de estudo para análise sistêmica do revestimento refratário de cadinho

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicação da primeira etapa de melhorias desenvolvida neste trabalho em outras unidades do grupo Alcoa.

- Testar em laboratório os quatro melhores materiais baseados nas informações dos fornecedores e nas diretrizes indicadas neste trabalho. Após os resultados obtidos classificar os dois mais indicados para teste prático em cadinho de transporte de metal interno.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEELEN, C.M.; BOL, L.C.G.M. Observations on the wear of refractory linings in aluminium remelting furnaces. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON REFRACTORIES, 1995, Aachen. **Anais...** Aachen, 1995. p.113-117.
- [2] GRJOTHEIM, K; HVANDE, H. **Introduction to aluminium electrolysis**. 2.ed. Dusseldorf: Aluminum – Vergan, 1993. 260 p.
- [3] HUDSON L.K. **Alumina production**. Pittsburgh: Alcoa Research Laboratories, 1969. 288 p.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. **O alumínio**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: 05/06/2010.
- [5] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Dicionário de mineralogia**. Disponível em: <<http://www.dnpm-pe.gov.br/>>. Acesso em: 06/12/2008.
- [6] ZANGIACOMI, C.E. **Processo de alimentação cubas**. Poços de Caldas: Alcoa-Poços, 2001. 20 p.
- [7] THE FREE DICTIONARY BY FARLEX. Disponível em: <<http://www.encyclopedia.thefreedictionary.com>>. Acesso em: 01/02/2009
- [8] NASH, W.A. **Resistência dos materiais**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Mc Graw-Hill, 1982. 521 p.
- [9] BEER, F. P.; JOHSTON JR, E. R. **Resistências dos materiais**, 3. ed. Rio de Janeiro: Makron Books, 1995. 1250 p.
- [10] BERNARDES, R. **Curso de inspeção e aplicação de revestimentos refratários**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 2001. 94 p.
- [11] LAFRAIA, J.R.B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 374 p
- [12] GESELLSCHAFT, D.; SCHORNSTEINBAU, F. **Refractory engineering**. 2. ed. rev. Dusseldorf: Vulkan-Verlag Essen, 1993. 452 p.
- [13] SCHACHT, C. A. **Refractories handbook**. Pittsburgh: Marcel Dekker, 2004. 499 p.
- [14] HARBISON-WALKER REFRACTORIES COMPANY. **Refractory fundamentals**. Pittsburgh, 2001. 34 p.

- [15] SANTOS, V.A. et al. Fundamentos e testes preliminares de resistência a erosão em concretos refratários **Cerâmica**, v. 52, p. 128-135, 2006.
- [16] BONADIA, P. et al. Aluminosilicate refractories for aluminum cell linings. **American Ceramic Society Bulletin**, Westerville, v. 84, n. 2, p. 26-31, 2005.
- [17] SILJAN, O.-J. et al. Refractories for molten aluminium contact - part 1, thermodynamics and kinetics. In: UNIFIED INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 2001, Cancun. **Anais...** Cancun: UNITECR, 2001. p. 531-550.
- [18] BRAULIO, M.A.L. et al. Análise sistêmica para seleção de refratários para transporte de alumínio líquido. **Cerâmica**, v. 52, n. 323, p.115-122, 2006.
- [19] SILJAN, O.-J.; SCHØNING, C. Refractories for Molten Aluminium contact Part II. Influence of pore size on aluminium penetration. In: UNIFIED INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 2001, Cancun. **Anais...** Cancun: UNITECR, 2001. p. 551-571.
- [20] KYNGERY, W.D. **Introduction to ceramics**. New York: John Wiley & Sons, 1976. 1032 p.
- [21] RAHAMAN, M.N. **Ceramic processing and sintering**. New York: Ed. Marcel Dekker, 1995. 770 p.
- [22] INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V.C. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários por meio das equações de Darcy e de Forchheimer. **Cerâmica**, São Paulo, v. 45, n. 292/293, p.61-67, 1999.
- [23] AKIYOSHI, M.M. et al. Propriedades relevantes para a otimização da secagem de concretos refratários. **Cerâmica**, São Paulo, v. 50, n. 314, p.89-93, 2004.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO – ABENDI. Disponível em: <abendi@abendi.org.br>. Acesso em: 29/05/2009.
- [25] PELIZZARI, E. et al. Aplicações da termográfica como ferramenta de manutenção preditiva em conectores elétricos. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006. p. 6315-6326.
- [26] VERATTI, A.B. **Termografia, princípios, aplicações e qualidade**. São Paulo: ICON Tecnologia, 1992. 64 p.

- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Annual book of ASTM Standards**. Philadelphia, 1995. 576 p. v. 15.01: Refractories; carbon and graphite products; activated carbon.
- [28] BONADIA, P. et al. Aluminosilicate refractories for aluminum cell Linnings, **American Ceramic Society Bulletin**, Westerville, v. 84, n. 2, p. 26-31, 2005.
- [29] PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DE CADINHOS. Poços de Caldas: Alcoa-Poços, 2009. 12 p.
- [30] CONTROLE DE LIMPEZA DE CADINHOS. Poços de Caldas: Alcoa-Poços, 2010. 150 p.
- [31] S.P.E DA RESTROESCADEIRA DE LIMPEZA DE CADINHO. Poços de Caldas: Alcoa-Poços, 2004. 10 p.
- [32] MECAFOR INC. Disponível em: <<http://www.mecfor.com/products.html>>. Acesso em: 12/12/10.
- [33] TECHMO. Disponível em: <http://www.techmo.it/products /ladle_ cleaning_ Station.htm>. Acesso em: 12/12/10.
- [34] RELATÓRIO DE MANUTENÇÃO DE CADINHO. Poços de Caldas: Alcoa-Poços, 2010.
- [35] INNOCENTINI, M.D.M. et al. Dewatering refractory castables. **American Ceramic Society Bulletin**, p. 9101-9108, 2004.
- [36] CARDOSO, F. A. **Avaliação das condições de processamento e aquecimento visando a otimização da secagem de concretos refratários**. 2004. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- [37] TECHAPPLICATION. **Electric resistance ladle preheating improves foundry operations**. Pittsburg: EPRI Center for Materials Production – CMP 079, 1992. 5 p.
- [38] CMP TECHCOMMENTARY. **Electric ladle preheaters**. Pittsburg: EPRI Center for Metals Production, 1988. 4 p.
- [39] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP. Faculdade de Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos. **IM351 – Tecnologia da Combustão**. Campinas, 2006. 25 p.

- [40] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Curso de combustão industrial**. São Paulo, 2006. 85 p.
- [41] ACETARC ENGINEERING COMPANY LTD. Disponível em: <<http://acetarc-engineering.co.uk/ladle-lph.html>>. Acesso em: 13/12/10.
- [42] SALMERON, R. A. **Eletricidade e magnetismo**. Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/termo/intro>>. Acesso em: 16/02/10.
- [43] O'CONNELL J. P.; HAILE J. M. **Thermodynamic fundamentals for application**. New York Ed: Cambridge University Press, 2005. 654 p.
- [44] STAS – Design and fabrication of industrial equipment. Disponível em: <http://www.stas.com/english/_catalogs/Pages/Crucible%20Preheating.aspx>. Acesso em: 13/12/10.