

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

ANDERSON CARVALHO NOGUEIRA

**UTILIZAÇÃO DO COMPOSTO $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ NAS
PROTEÇÕES CERÂMICAS DAS MÁQUINAS DE INJEÇÃO DE
MASSA NOS FUROS DE RETIRADA DE FERRO GUSA E ESCÓRIA
DO INTERIOR DOS ALTOS FORNOS.**

VOLTA REDONDA

2014

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**UTILIZAÇÃO DO COMPOSTO $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ NAS
PROTEÇÕES CERÂMICAS DAS MÁQUINAS DE INJEÇÃO DE
MASSA NOS FUROS DE RETIRADA DE FERRO GUSA E ESCÓRIA
DO INTERIOR DOS ALTOS FORNOS.**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda - UNIFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, na Linha de Pesquisa em Materiais.

Aluno:

Anderson Carvalho Nogueira

Orientador:

Dr. Roberto de Oliveira Magnago

VOLTA REDONDA

2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

Anderson Carvalho Nogueira

Utilização do Composto $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ nas Proteções Cerâmicas das Máquinas de Injeção de Massa nos Furos de Retirada de Ferro Gusa e Escória do Interior dos Altos-Fornos

Orientador: Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago



Prof. Dr. Luiz de Araújo Bicalho



Profa. Dra. Juliana Kelmy Macário de Faria Daguano

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todos aqueles que colaboraram em sua preparação, em particular:

Ao Orientador prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago pela dedicação e pela experiência passada;

A minha esposa Marília e aos meus filhos Arthur e Ana Flávia por ser a inspiração de cada sonho realizado e o motivo que proporcionou cada conquista;

A Deus por cada dia dessa vida, e pela oportunidade de sempre praticar o bem.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao Engenheiro Almir Benedito de Castro especialista em altos fornos por todo embasamento e apoio tecnológico fornecido;

A equipe técnica da empresa Morganite do Brasil, em especial ao Sr° Leonardo Moreira de Lima que forneceu o suporte necessário para realização deste trabalho acadêmico;

Ao prof. Dr. Claudinei dos Santos pelo acompanhamento e embasamento científico nas atividades executadas de caracterização;

A equipe dos altos fornos da empresa ThyssenKrupp - CSA Siderúrgica do Atlântico pelo comprometimento e auxílio na realização dos testes de campo.

RESUMO

A produção de aço em usinas siderúrgicas integradas se faz através do ferro gusa líquido produzido em elevadas temperaturas nos altos fornos. O ferro gusa é retirado de dentro do reator (alto forno) por um furo denominado furo de gusa, que necessita ser fechado ou tamponado quando há saída de gases pelo mesmo. Para preservar as partes metálicas da máquina de injeção de massa no furo de gusa, são utilizadas proteções cerâmicas de elevado custo. Esse trabalho acadêmico propõe a utilização de um novo composto a base de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ a ser aplicado nestas proteções cerâmicas, com a finalidade de reduzir o custo mantendo o mesmo desempenho operacional. Foram feitas análises dos diagramas de fases ternário $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}$ para verificação se o novo composto atenderia as solicitações térmicas em torno de 1500°C . A nova proteção cerâmica foi caracterizada e teve sua morfologia definida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX). Para averiguação da eficiência do novo composto foram produzidos 5 protótipos testados nos altos fornos 1 e 2 da empresa ThyssenKrupp CSA Siderúrgica do Atlântico. O resultado apresentado pelo novo modelo de proteção a base de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ foi uma economia de R\$ 76 mil reais anuais. Esse valor corresponde a uma economia de 36% comparada com o composto anteriormente utilizado á base de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. O desempenho operacional não foi comprometido e em todos os fechamentos realizados com as 5 amostras houve a preservação da parte frontal metálica da máquina de injeção de massa nos furos de retirada de ferro gusa e escória líquidos. A nova proteção mostrou em sua morfologia menos fibras o que a torna possivelmente menos prejudicial ao aparelho respiratório, pois essas fibras quando inaladas podem provocar danos aos tecidos internos dos pulmões. O aço é um material usado como elemento de base, seja nos setores de transporte, construção civil ou bélica. Contribuir com a redução de seu custo por intermédio da matéria prima ferro gusa produzida em altos fornos, é contribuir com o desenvolvimento da própria humanidade.

Palavras-chave: Sílica; Proteção Cerâmica; Ferro Gusa; Alto forno.

ABSTRACT

The production of steel in integrated steel mills is through the molten pig iron produced in the blast furnace temperatures. The pig iron is removed from inside the reactor (furnace) by the a hole called hole pig iron, which needs to be closed when have gases output. To preserve the metal parts of the injection machine mass in the hole, are used ceramic protections of high cost . This academic paper proposes the use of a new compound based $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ to apply these ceramic protections, in order to reduce the cost while maintaining the same operational performance. Analysis of ternary phase diagrams of $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}$ were asked to check if the new compound would meet the thermal stresses around 1500°C . The new ceramic protection was characterized and had their morphology defined by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray diffraction (XRD). To investigate the efficiency of the new compound 5 prototypes tested in blast furnaces 1 and 2 of ThyssenKrupp CSA Atlantic Steel. The result presented by the new protection model based $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ was a saving of R\$ 76 000 annual. This value corresponds to a saving of 36% compared with the compound previously used based on $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Operating performance is not was compromised and the injection performed with five samples resulted the preservation of metallic front of the machine injection mass. The new protection in their morphology showed less fiber making it possibly less harmful to the respiratory tract because these fibers when inhaled can cause damage to internal tissues of the lungs. Steel is a material used as base element, either in the transportation, construction civil or war. Contribute to the reduction of their cost through the pig iron produced in blast furnaces, is to contribute to the development of humanity itself.

Keywords: Silica; Ceramic Protection; Pig Iron; Blast Furnace.

4.1.2.Fabricação da Proteção Cerâmica.....	50
4.2. Métodos.....	52
4.2.1. Análise dos diagramas ternários dos elementos químicos das proteções cerâmica.....	52
4.2.2. Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Difração de Raios – X.....	53
4.2.3. Caracterização das densidades das proteções cerâmicas.....	54
4.2.4. Testes em Campo da Substituição das Proteções Cerâmicas.....	55
5. RESULTADOS.....	58
6. DISCUSSÃO.....	71
7. CONCLUSÃO.....	72
8. TRABALHOS FUTUROS.....	73
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Atuação das principais matérias primas na massa tamponamento. [37].	47
Tabela 2 – Especificação dos produtos utilizados neste trabalho [33]	49
Tabela 3 – Teste de campo amostra 1 - proteção de SiO ₂	63
Tabela 4 – Teste de campo amostra 2 - proteção de SiO ₂	65
Tabela 5 – Teste de campo amostra 3 - proteção de SiO ₂	67
Tabela 6 – Teste de campo amostra 4 - proteção de SiO ₂	69
Tabela 7 – Teste de campo amostra 5 - proteção de SiO ₂	70
Tabela 8 – Temperatura de contato e massa injetada no furo de corrida	71
Tabela 9 – Diferença de custo entre as proteções.	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação dos materiais cerâmicos adaptado de JRR Silva [5]	20
Figura 2 - Moinho de bolas [16].....	23
Figura 3 - Detalhe de granulados obtidos em ampliação [17]	25
Figura 4 - Pó cerâmico em estágio de sinterização[24].....	27
Figura 5 - Manta em formato especial á vácuo citado em relatório técnico da Morganite do Brasil [33]	31
Figura 6 - Lay out usinas integradas fonte Instituto Aço Brasil[34].....	32
Figura 7 – Regiões do alto-forno conforme descrito por Gandra. [35].....	33
Figura 8 – Redução do óxido de ferro do minério (magnetita, wustita) pelo %CO. [36]	35
Figura 9 - Redução do óxido de ferro do minério (magnetita, wustita) pelo H. [36]...	36
Figura 10 – Lay out adaptado da área de retirada de ferro gusa e escória líquidos dos altos fornos (sala de corridas). [2]	38
Figura 11 - Furo de corrida de ferro gusa em altos fornos (furo de gusa).[35]	39
Figura 12- Esquema com as principais regiões do alto-forno destacando a posição do furo de corrida. [35]	40
Figura 13 – Variação na pressão de sopro do ar em função do ciclo de vazamento de gusa e escória, segundo Kitaev <i>et. al.</i> [35] [36].....	42
Figura 14 – Seção vertical do cadinho com posições distintas do homem morto ,AF5 - Higashida (a) e AF4 – Kukioka (b) segundo Kambara <i>et al.</i> ,citado por Figueira <i>et al.</i> [36]	43
Figura 15 – Vista esquemática das forças atuantes no cadinho de um alto forno e que determinam a posição do homem morto. [35] [36]	44
Figura 16 e 17 – Amostra proteção cerâmica SiO ₂ (62-68)-MgO+CaO(29-39). [33]..	48
Figura 18 - Manta cerâmica em lâmina. [33]	50
Figura 19 - Desenho parte frontal da máquina de injeção usado para dimensionar o molde. [38].....	51
Figura 20 - Diagrama ternário SiO ₂ (62-68)-MgO+CaO(29-39)[39].....	53
Figura 21 – Balança Analítica Sartorius.....	54

Figura 22 – Amostras de proteção cerâmica de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ e $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ com seus respectivos pesos em grama.....	55
Figura 23 – Procedimento para execução de testes de campo com a proteção cerâmica de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$. [41]	56
Figura 24 – Planilha usada para acompanhar os testes de campo. [41]	57
Figura 25- Microscopia Eletrônica de Varredura dos compostos $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ e $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$	58
Figura 26 – Difratoograma $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$	61
Figura 27 – Difratoograma $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	61
Figura 28 – Teste de campo com amostra 1 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$	64
Figura 29 – Teste de campo com amostra 2 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$	66
Figura 30 – Teste de campo com amostra 3 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$	68
Figura 31– Teste de campo com amostra 4 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$	69
Figura 32 – Teste de campo com amostra 5 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$	70

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Quantidade do meio de moagem [5].....	23
Equação 2 – Densidade da barbotina [5].....	24
Equação 3 – Reações de redução em alto forno [36].....	37
Equação 4 – Diferencial de pressão no interior do alto forno [32].....	41
Equação 5 – Peso da carga dentro do cadinho do alto forno [35].....	43
Equação 6 – Densidade teórica da proteção cerâmica de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	62
Equação 7 – Densidade teórica proteção cerâmica de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$..	62

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 - Teste de campo amostra 1 proteção cerâmica SiO_2 (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica.....	74
Anexo 2 - Teste de campo amostra 2 proteção cerâmica SiO_2 (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica.....	75
Anexo 3 - Teste de campo amostra 3 proteção cerâmica SiO_2 (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica.....	76
Anexo 4 - Teste de campo amostra 4 proteção cerâmica SiO_2 (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica.....	77
Anexo 5 - Teste de campo amostra 5 proteção cerâmica SiO_2 (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica.....	78

LISTA DE SIGLAS

Q - Quantidade do meio de moagem (Kg);
Vu - Volume útil do moinho (L);
d - Densidade do meio de moagem (g/cm^3);
 ρ - Percentual de ocupação aparente do meio de moagem;
 ρ - Densidade (g/cm^3);
m - Massa (g);
V - Volume (cm^3);
Peso C - Peso do carbono;
RD - Redução direta;
DP - Diferencial de pressão;
V - Volume interno;
VS - Volume de sopro;
P - Pressão;
E - Fração de vazios do leito, dentro do cadinho (-);
 dP/dt - Variação da pressão (bar/h);
G - Produção, obtida pelo balanço de oxigênio (t/d);
A - Área do cadinho (m^2);
SR - Slag-rate (kg/t);
 V_{HM} - Volume de metal presente no cadinho (m^3);
 H_{HM} - Espessura da camada de metal, com coque (m);
 H_{SL} - Espessura da camada de escória, com coque (m);
W - Peso da carga (t/m^2);
 ρ_{HM} - Densidade do metal (kg/m^3);
 ρ_{C} - Densidade do coque (kg/m^3).

1. INTRODUÇÃO

O aço vem desenvolvendo seu papel de impulsionar o desenvolvimento de nações desde antes de Cristo, quando na antiguidade em 1200 a.C. as tecnologias da metalurgia do aço começaram a fazer parte do cenário da Europa Ocidental. A importância deste evento é tão clara que temos um período na história destinado e com a nomenclatura de Idade do Ferro, onde as tribos que possuíam a tecnologia de fabricação do ferro mesmo na sua forma mais rústica, possuíam as melhores armas, embarcações e os melhores túmulos para sepultamento de seus reis.

Em épocas atuais o cenário não é muito diferente, pois o aço continua sendo elemento alavancador de desenvolvimento, devido sua aplicação na construção civil (pontes, edifícios, viadutos), material bélico (aviões, tanques, armas), transportes (aviões, ferrovias, estradas, veículos, navios), utilidades domésticas em geral e outras aplicações. As nações que possuem aço teoricamente serão as mais desenvolvidas pelos fatores citados.

Segundo a OMC (Organização Mundial do Comércio) dentre os países que mais exportaram aço estão: Japão, Alemanha, França, Bélgica e Itália. O Brasil ocupa a 14ª posição. Entre os importadores de aço temos Estados Unidos, Alemanha, China, França e Itália. Podemos concluir que entre a maioria das nações exportadoras ou importadoras de aço estão às maiores nações mundiais, vindo ao encontro da teoria de necessidade de aço para o desenvolvimento. [1]

Dentre as principais tecnologias de produção de aço está a redução do minério de ferro em altos fornos de usinas integradas produzindo ferro gusa, que é utilizado posteriormente como matéria prima em aciarias. O custo da produção do ferro gusa é alavancado ou maximizado principalmente pelos seguintes fatores: elemento combustível e redutor (coque ou carvão), carga metálica (minério de ferro, pelota ou sinter) e podemos citar também as cerâmicas avançadas que são utilizadas para manutenção de canais de corrida ou como insumos (massa de tamponamento, concretos refratários e fibras para isolamentos).

As operações de escoamento do ferro gusa líquido a temperaturas em torno de 1500°C pela sala de corridas dos altos fornos, são bastante complexas e envolvem uma grande quantidade dessas cerâmicas avançadas capazes de suportarem essa solicitação térmica.

A redução do custo de fabricação do ferro gusa que é a principal matéria prima para a produção do aço em qualquer dos itens citados, tornará essa matéria prima cada vez mais acessível. Assim o aço poderá cada vez mais exercer seu papel de elemento importante no crescimento e desenvolvimento da história da humanidade. [2]

2. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

Esse trabalho acadêmico tem como objetivo a substituição da proteção cerâmica utilizada na máquina de injeção de massa refratária, nos furos de retirada de ferro gusa e escória líquida do interior do cadinho dos altos fornos.

A substituição deverá ser feita devido as cerâmicas avançadas possuírem considerado custo de processamento e fabricação, onerando cada vez mais os valores de aquisição no setor comercial.

A substituição se dará por outra de menor valor agregado com a finalidade de reduzir o custo e deverão ser avaliados e garantidos:

- a) Proteção da parte frontal;
- b) Características de resistência a elevadas temperaturas na proteção cerâmica.

A justificativa deste trabalho é a redução do custo de fabricação do elemento alavancador de desenvolvimento aço, através do fornecimento de um ferro gusa de menor custo.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Materiais

Os materiais sólidos existentes são frequentemente classificados em três grupos principais: materiais metálicos, materiais cerâmicos e materiais poliméricos ou plásticos. Esta classificação é baseada na estrutura atômica e nas ligações químicas predominantes em cada grupo. Nas últimas décadas um quarto grupo foi incorporado a essa classificação esse grupo é denominado materiais compósitos. Neste trabalho acadêmico usamos um material cerâmico para reduzir custo de fabricação de um material metálico produzido em larga escala industrial, isso nos mostra que apesar de possuírem características distintas, esses materiais estão normalmente sendo utilizados simultaneamente, devido à necessidade de aproveitamento das características comuns e intrínsecas proveniente de cada tipo de material. [3]

3.1.1. *Materiais cerâmicos*

Os materiais cerâmicos (figura 1) são constituídos de combinações de metais com elementos não metálicos. Os principais tipos são: óxidos, nitretos e carbonetos. A esse grupo de materiais também pertencem os argilo-minerais como o cimento e os vidros. Do ponto de vista de ligações químicas, eles podem ser desde predominantemente iônicos até predominantemente covalentes.

Eles possuem as seguintes características: isolantes térmicos e elétricos, resistentes a altas temperaturas e a ambientes corrosivos. São muito duros, porém são frágeis. A argila foi o primeiro material cerâmico a adquirir propriedades completamente novas como resultado de uma operação, denominada “queima” (sinterização). Essa operação a tornou possível de obtenção de potes, painéis e outros utensílios cerâmicos que proporcionou enorme impacto na vida e nos hábitos do homem. Segundo Kranzberg e Smith, este foi talvez o começo da engenharia de materiais. Estima-se que isto tenha ocorrido no oitavo milênio a.C.

A cerâmica vermelha (telhas, tijolos e manilhas) e a cerâmica branca (azulejos, sanitários e porcelanas) são constituídas principalmente de silicato

hidratado de alumínio, como caulinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, haloisita $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$, pirofilita $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ e montmorilonita $(Mg;Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot Si_5O_{10} \cdot nH_2O$. O óxido de ferro é que confere a cor avermelhada de muitos produtos cerâmicos. As cerâmicas avançadas à base de sílica, alumina ou magnésia, são também muito utilizadas como refratários em fornos e dispositivos utilizados na fusão e tratamentos térmicos dos metais e ligas. Enquanto cerâmicas tradicionais são obtidas a partir de matérias primas naturais tais como argilo-minerais e areia; as cerâmicas avançadas são feitas a partir de óxidos, nitretos, carbonetos e boretos de alta pureza, têm composição definida, a forma e a distribuição das partículas são controlados. Os vidros tradicionais são misturas de óxidos e devem ser classificados como materiais cerâmicos. [4]

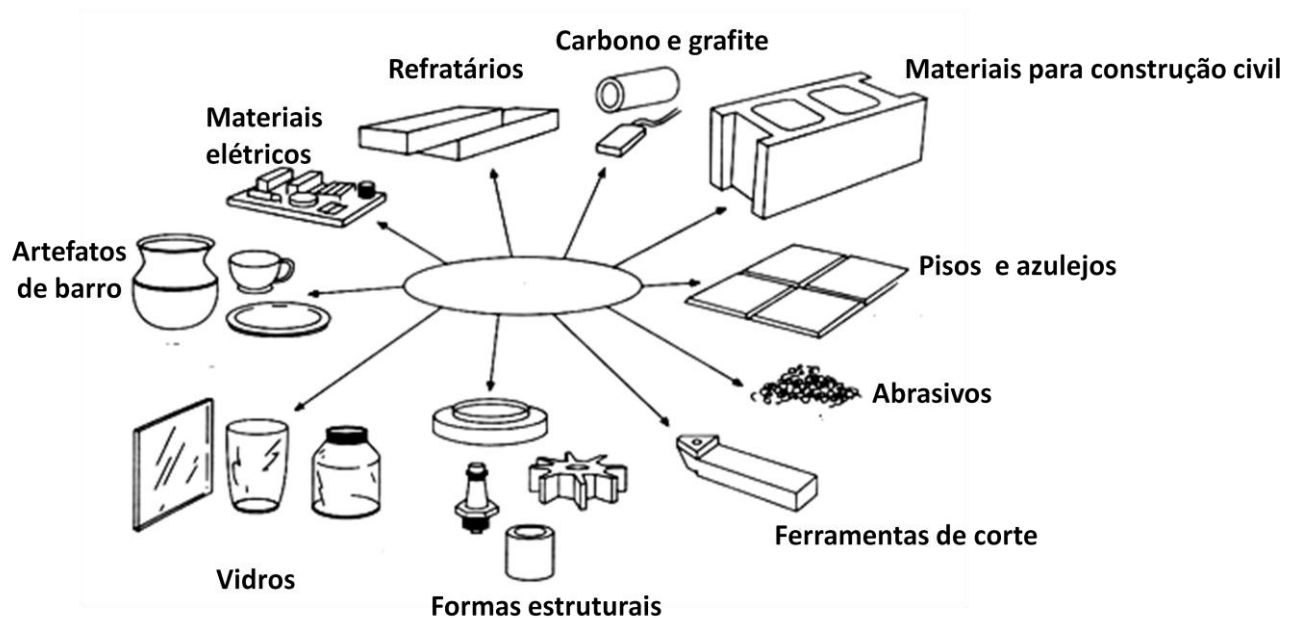


Figura 1 - Aplicação dos materiais cerâmicos adaptado de *JRR Silva* [5]

3.1.1.1. Matérias-Primas Cerâmicas

As matérias-primas utilizadas na fabricação dos produtos cerâmicos são originadas na natureza [6]. Algumas são incorporadas aos produtos em sua forma natural como as argilas, feldspatos, albitas, filitos, talcos e calcários. Outras são previamente beneficiadas e processadas [7]. Podemos executar a classificação das matérias primas cerâmicas em dois grupos: plásticos (materiais argilosos) e não plásticos (fundentes, inertes, carbonatos, talcos) [8]. As matérias primas plásticas

conferem importantes características na fase de conformação das peças cerâmicas, tais como trabalhabilidade e resistência mecânica a cru, e no processamento térmico estrutura e cor. [9]

As matérias primas não plásticas também atuam nas fases de conformação e secagem, diminuindo a retração das peças e favorecendo a secagem na fase do processamento térmico, onde desempenham o papel mais relevante. Controlam as transformações, as deformações e a sinterização, devido principalmente ao seu papel na fase de queima. Os materiais não plásticos são ainda qualificados de inertes, vitrificantes e fundentes. [10]

As argilas são as principais matérias primas da indústria cerâmica e, portanto, são utilizadas em grandes quantidades. Para que sejam economicamente viáveis é necessário que essas matérias primas tenham um custo de extração e beneficiamento baixo.

A grande diversidade de argila encontrada na superfície da Terra permite que se obtenham produtos cerâmicos com as mais diversas características tecnológicas. O entendimento das características físicas, químicas e mecânicas das argilas é fundamental no processamento cerâmico, a fim de se obter informações para a avaliação de seus usos específicos e obter produtos de boa qualidade.

3.1.1.1.1. Massa Cerâmica

O termo massa cerâmica corresponde a uma mistura de matérias-primas preparadas para a fabricação de um produto cerâmico. As massas cerâmicas tradicionais são denominadas de acordo com características particulares, tais como cor, textura e conformação [11]. A indústria cerâmica possui uma massa para cada produto. Essa massa estabelece a proporção, em peso ou em volume, das diversas matérias-primas utilizadas [12]. A seleção das matérias primas componentes da massa cerâmica deve ter como critério básico, as propriedades requeridas ao produto e as características inerentes ao processo de fabricação.

Na fabricação de peças cerâmicas é comum a mistura de dois ou mais materiais para a composição da massa [13], como aditivos e água. Dificilmente uma única matéria-prima fornecerá sozinha a melhor estrutura interna e qualidade possível à massa cerâmica. Essa formulação de massa busca em geral de forma

empírica, uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, de modo a possibilitar uma fácil compactação e resistência mecânica na queima [14].

3.1.1.2. Preparação da matéria prima e da massa cerâmica

Os processos de fabricação empregados pelos diversos segmentos cerâmicos assemelham-se parcial ou totalmente. Compreendem na grande maioria das vezes as etapas de preparação da matéria prima e da massa, conformação da peça e tratamento térmico.

Grande parte das matérias primas utilizadas na indústria cerâmica tradicional é natural. Sua extração é realizada a “céu aberto” e são antecedidas de estudos das características do material a ser explorado. Após a mineração os materiais devem ser desagregados ou moídos e classificados de acordo com a granulometria. As matérias-primas sintéticas geralmente são fornecidas prontas para o uso. A preparação da massa tem como objetivo proporcionar uma mistura íntima e homogênea das matérias-primas, o objetivo dos aditivos é adequar a massa para a etapa de conformação. Segundo Vicenzi [15] a massa para fabricação de produtos cerâmicos é dita ideal quando cumpre algumas condições, como a relação entre materiais plásticos e não plásticos que deve ser tal que confira à massa cerâmica a plasticidade necessária para permitir a conformação e proporcionar adequada resistência mecânica à verde. A massa cerâmica deve também apresentar uma adequada composição química e mineralógica de modo que as transformações físico-químicas, que têm lugar durante o processo de queima, confirmem ao produto acabado as características desejadas.

3.1.1.2.1. Moagem

O objetivo da moagem (figura 2) é diminuir, o máximo possível, o tamanho da partículas das matérias-primas envolvidas no processo e garantir homogeneização da massa cerâmica dentro de uma distribuição granulométrica definida. Uma boa eficiência de moagem está intrinsecamente ligada ao controle do meio de moagem conforme citado pela expressão (1). É uma etapa em que se deve ter um controle sobre a granulometria da barbotina, que é uma solução resultante da moagem e que consiste de matérias-primas e água, isto dentro de um processo de moagem

chamado via-úmido. Um alto grau de moagem pode influenciar na reatividade entre os vários componentes durante a queima devido à maior área de contato superficial entre as partículas, contribuindo na melhoria da resistência mecânica do material queimado.

$$Q = v_u \times d \times p \times 0,60 / 100$$

Equação 1 – Quantidade do meio de moagem [5]

Onde que:

Q : Quantidade do meio de moagem (kg);

v_u : Volume útil do moinho (l);

d : Densidade do meio de moagem (g/cm^3);

p : Percentual de ocupação aparente do meio de moagem;

0,60: Fator que se considera para o volume ocupado por bolas, o restante são espaços vazios;



Figura 2 – Moinho de bolas para moagem de argilas tipo Cardall. [16]

3.1.1.2.2. Densidade e viscosidade da massa cerâmica (barbotina)

Em suspensões cerâmicas preparadas para a atomização (etapa posterior à moagem), é importante conhecer o teor de sólidos e em consequência a densidade. A capacidade produtiva do atomizador é totalmente limitada pela quantidade máxima de água a evaporar. Portanto, quando há um maior conteúdo em sólidos na barbotina gera menor consumo energético e maior produção. A expressão (2) descreve a relação de densidade:

$$\rho = m / v$$

Equação 2 – Densidade da barbotina [5]

Onde que:

ρ : Densidade (g/cm^3);

m : Massa (g);

v : Volume (cm);

A viscosidade é uma variável importante nas massas cerâmicas. Em barbotinas preparadas para a atomização onde é necessário aumentar o conteúdo de sólidos até onde seja possível, este parâmetro tem um papel importante no rendimento da moagem. Na moagem a adição de água é limitada, com isso há um aumento na viscosidade da barbotina. Como a densidade não pode ser variada a única solução consiste na adição de um agente aditivo para acelerar e tornar homogenia a densidade nas descargas dos moinhos.

3.1.1.2.3. Atomização

Nesta etapa do processo é realizada a evaporação parcial da água da barbotina, acarretando a formação de aglomerados esféricos também conhecidos por pó atomizado. (figura 3)

Suas características e propriedades como o tamanho e o formato, devem ser adequadas para as operações seguintes como alimentação da prensa e a própria prensagem.

A distribuição granulométrica das massas cerâmicas e dos aglomerados deve ser perfeitamente controlada, que é ponto importante para a etapa de prensagem. Esta variação nos tamanhos dos aglomerados formados é resultado da operação de atomização e consiste em três etapas: formação das gotículas, secagem das gotículas em ar quente e separação do pó seco. A formação dos aglomerados se dá então pela retirada da água e os seus tamanhos são previamente determinados pelos diâmetros das aberturas dos bicos pulverizadores do equipamento.

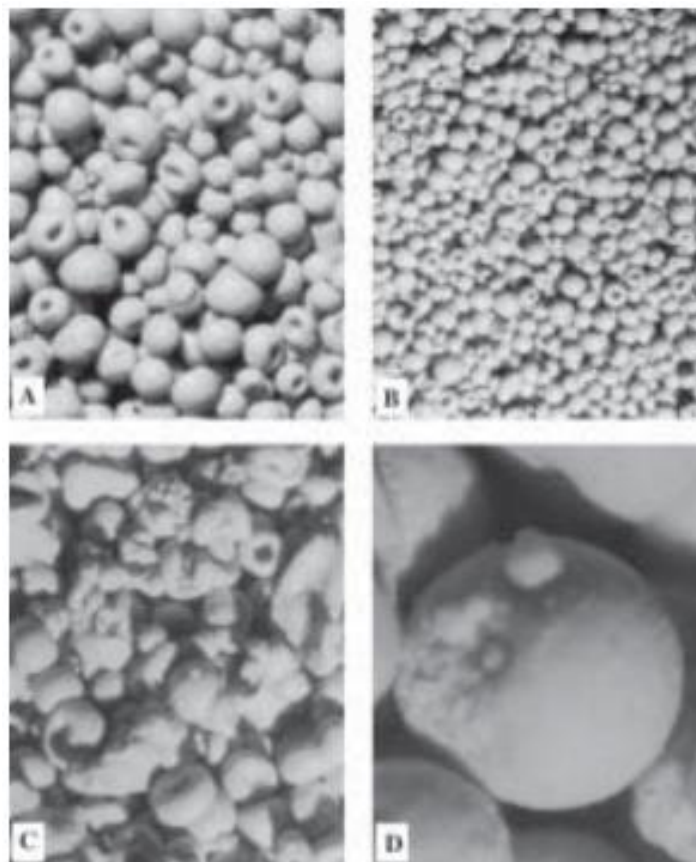


Figura 3 – Detalhe de granulados obtidos em ampliação de (A)33x , (B)33x , (C)33x , (D)108x. [17]

3.1.1.2.4. Conformação

A etapa de conformação é fundamental, visto que o material adquire a forma e características estruturais pretendidas [18]. Para tal fato, se faz necessário que a massa a ser conformada tenha uma certa quantidade de água em sua mistura. Segundo REED [19], a prensagem é o procedimento de conformação mais utilizado

na indústria cerâmica, devido a sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, com baixa tolerância dimensional. Distinguem-se duas grandes modalidades de prensagem: a prensagem uniaxial e a prensagem isostática. Na primeira, a compactação do pó se realiza em uma matriz rígida, por aplicação de pressão na direção axial, através de um ou vários punções rígidos. Na prensagem isostática, a compactação do pó se dá no interior de um molde flexível, sobre o qual atua um fluido pressurizado.

3.1.1.2.5. Secagem

O objetivo da secagem é o de reduzir a água utilizada na etapa de conformação, necessária para a obtenção de uma massa plástica. A secagem pode ser natural (exposição das peças ao ar livre) ou forçada (secadores intermitentes ou contínuos). [20]

Quando a secagem é natural, a sua duração é função das condições de estado do ar atmosférico (temperatura e umidade relativa) e da ventilação do local, podendo chegar a períodos de até seis semanas. A secagem artificial é realizada em fornos a temperatura de 80°C a 110°C e o seu período de secagem depende das características da matéria-prima, do formato das peças e do tipo do secador. Entretanto há uma variação média de 12 a 40 horas [21]. A água deve ser eliminada de forma lenta e gradual de maneira a evitar tensões, e conseqüentemente, defeitos. Durante a secagem, o teor de umidade dos produtos reduz de 20 a 25%. [22]

3.1.1.2.6. Queima / Sinterização

Na queima ou sinterização (figura 4), os produtos cerâmicos adquirem suas propriedades finais tais como resistência mecânica e cor. As peças após a secagem, são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas que para a maioria dos produtos situa-se entre 800°C a 1700°C, em fornos contínuos ou intermitentes. Esses fornos operam em três fases: i) aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada; ii) patamar durante certo tempo na temperatura especificada; iii) resfriamento até temperaturas inferiores a 200°C.

O processo de queima ocorre em três estágios: i) reações preliminares a sinterização, que incluem a queima da matéria orgânica e a eliminação de produtos

de decomposição e oxidação; ii) sinterização, que é a consolidação caracterizada pela contração (implica que dentro do produto as partículas se unem em um agregado que possui resistência mecânica) e densificação do produto; iii) resfriamento.

Segundo Lobato [23], os refratários estão divididos quimicamente em duas categorias principais: básicos e não básicos. Os refratários básicos são compostos basicamente por minerais a base de magnésio e cálcio. Os refratários não básicos, por sua vez, são compostos principalmente por minerais a base de sílica e alumina. O consumo anual de refratários no Brasil vem se mantendo próximo a 500.000 toneladas por ano, sendo que produtos importados representam entre 5 e 10% deste valor. O faturamento anual está ao redor de R\$ 1,4 bilhão, gerando entre 5.000 e 6.000 empregos diretos e indiretos.

O setor de refratários é dominado por empresas com alto padrão de organização e profissionalismo e é formado por cerca de 30 empresas. Os principais insumos minerais para produção de refratários são magnésia e alumina em suas diversas formas.

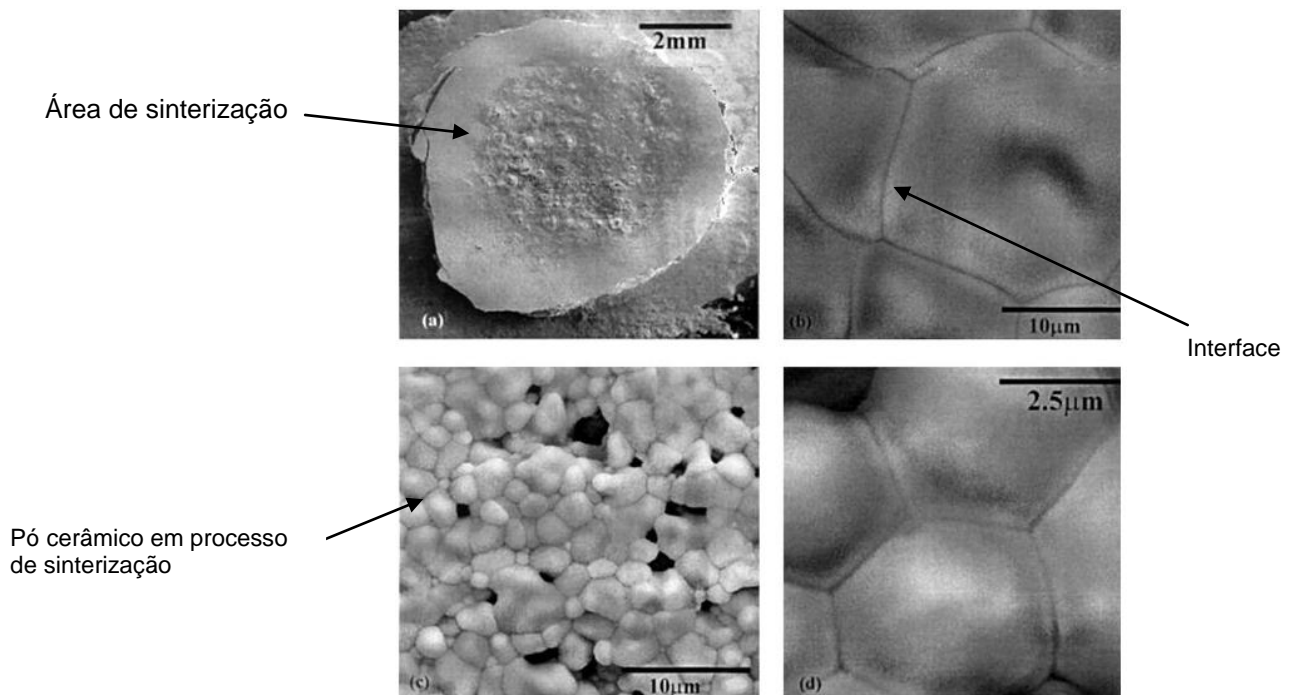


Figura 4 – Pó cerâmico em estágio de sinterização. [24]

3.1.1.3. Classificação dos materiais cerâmicos

Segundo Carter e Norton [25], existem duas classificações entre as cerâmicas: tradicionais e avançadas. As cerâmicas tradicionais são geralmente fabricadas a partir de matérias-primas naturais e processadas por métodos convencionais [26]. As cerâmicas avançadas são feitas a partir de materiais altamente refinados ou sintéticos e muitas vezes, têm microestruturas projetadas para otimizar as propriedades mecânicas [27]. Enquanto as cerâmicas tradicionais à base de argila tem sido usadas por mais de 25.000 anos, as cerâmicas avançadas foram desenvolvidas somente nos últimos 100 anos. No Brasil de acordo com Bustamante e Bressiani (2000) [28], convencionou-se em definir o setor cerâmico em segmentos que se diferenciam pelos produtos obtidos e mais precisamente pelos mercados aos quais estes se inserem. O segmento que se destaca é o da cerâmica vermelha, devido ao volume de produção e ao grande mercado consumidor. Outro setor importante da indústria cerâmica utilizado em larga escala é a cerâmica refratária [29]. A cerâmica vermelha e os materiais refratários estão dentro dos grandes consumidores de matérias primas minerais e a grande maioria das unidades fabris bem como as minerações, concentra-se geograficamente nas regiões Sul e Sudeste.

3.1.1.3.1. Cerâmica Vermelha ou Cerâmica Tradicional

A cerâmica vermelha também conhecida como cerâmica estrutural é caracterizada por produtos oriundos da argila ou misturas contendo argila. Caracteriza-se pela cor vermelha de seus produtos, que são tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais e agregados leve de argila expandida. No Brasil, o setor de cerâmica vermelha conta com aproximadamente 7.400 unidades produtivas e gera em torno de 293 mil empregos diretos. Estimativas elaboradas pela Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia indicam que a produção de cerâmica vermelha é cerca de 84,8 bilhões de peças, correspondendo a 70% de blocos/tijolos e 30% de telhas e estima-se um faturamento de R\$ 7 bilhões. O consumo e a produção do Brasil colocam o país como um dos maiores do mundo, ficando atrás apenas da China e Índia.

Entre os segmentos cerâmicos a cerâmica vermelha responde pela maior parcela do consumo de argila, devido ao grande número de indústrias e ao fato de ser praticamente o único tipo de matéria-prima empregada em seus processos produtivos. Inúmeros estudos buscam avaliar as características e propriedades tecnológicas de argilas brasileiras utilizadas como matéria-prima na fabricação de cerâmica vermelha. [30]

3.1.1.3.2. Materiais Refratários

Os refratários ou cerâmicas avançadas são produtos que pertencem ao universo que possuem a característica principal de resistir às altas temperaturas. Por definição a sua temperatura de fusão deve ser superior a 1580°C. Não devem ser apenas resistentes ao calor, mas possuem também outras características como: baixo coeficiente de dilatação térmica, alta resistência à compressão, impactos, saltos térmicos, e não devem reagir com as substâncias as quais venham a ter contato. [31]

Os materiais refratários são comercializados em uma grande variedade de formas, mas os tijolos são a forma mais comum. Dentre as aplicações típicas podem ser citados revestimentos de fornos para refino de metais, fabricação de vidro, tratamento térmico metalúrgico e geração de energia. A composição química dos refratários pode variar consideravelmente, dependendo do campo específico de uso.

3.1.1.4. Fibras Cerâmicas

As lãs ou mantas cerâmicas, são produzidas a partir da fusão a 2.400°C de partículas de alumina e de quartzo. Essas partículas são aquecidas e fundidas em fornos de filamentos elétricos e recebem sopro de ar para formação de fibras, processo denominado “Radial Blowing” (Sopro Radial). Normalmente faz parte da formulação a zirconita, para aumentar a refratariedade da fibra. O resultado é um produto leve, flexível e totalmente inorgânico obtido através de entrelaçamento das fibras produzidas pelo sopro radial. Esse produto é denominado manta cerâmica. As mantas cerâmicas são aplicadas em mais de 50 tipos de produtos, fornecendo soluções para aplicações de alta temperatura em uma larga escala no mercado. [32]

As principais vantagens dos materiais feitos com manta cerâmica são [32]:

- a) **Baixo peso:** Os equipamentos isolados com manta cerâmica são 75% mais leves que os refratários isolantes e 90 à 95% mais leves que os refratários densos;
- b) **Baixo calor armazenado;**
- c) **Resistência ao choque térmico;**
- d) **Eficiência térmica:** baixos valores de condutibilidade térmica, aproximadamente 0,46 K m/W que permitem revestimentos 45% menores que as espessuras exigidas por uma composição de refratários-isolantes.
- e) **Flexibilidade de enformamento:** o revestimento com manta cerâmica possibilita que os ciclos de aquecimento e resfriamento sejam acelerados;
- f) **Resistência às Intempéries:** se molhada por água, vapores ou óleo, suas propriedades físicas permanecem inalteradas após a secagem;
- g) **Resistência a choques mecânicos:** pela sua constituição, não suportam choques mecânicos severos; na forma de placas rígidas são particularmente resistentes;
- h) **Resistência à ataque químico:** possui excelente estabilidade química, não sendo afetada pela maioria dos produtos químicos, com exceção dos ácidos fluorídricos, fosfóricos e álcalis concentrados. As fibras cerâmicas podem ser produzidas não só no formato de lâminas de fibras conforme figura mas também na forma de flocos, papéis, placas, mantas, formatos especiais á vácuo (figura 5), entre outros.



Figura 5 – Manta em formato especial á vácuo, citado em relatório técnico da Morganite do Brasil [33]

Devido os fatores mencionados as fibras cerâmicas são consideradas como elementos de grande importância nos processos industriais principalmente naqueles onde há grandes gradientes de temperatura. As propriedades mencionadas proporcionam as fibras desempenhos favoráveis em condições de trabalho até então não satisfatórias a pessoas ou equipamentos.

3.2. O Alto Forno

Na fabricação do aço há dois métodos de fabricação em larga escala propriamente ditos, o que tange as usinas siderúrgicas integradas (figura 6) e o outro método é aquele que se refere as usinas semi integradas. A principal e peculiar diferença entre esses dois métodos está em que um faz o processamento, a transformação da matéria prima na sua forma rudimentar (óxido), ou seja as usinas siderúrgicas integradas reduzem os óxidos dos minérios ou carga metálica agregada (sinter) em reatores de grande porte denominados altos fornos, por um processo denominado de redução. Usinas semi integradas iniciam seu processo produtivo propriamente dito a partir de cargas metálicas já elaboradas e previamente reduzidas como as sucatas.

Fluxo Simplificado de Produção

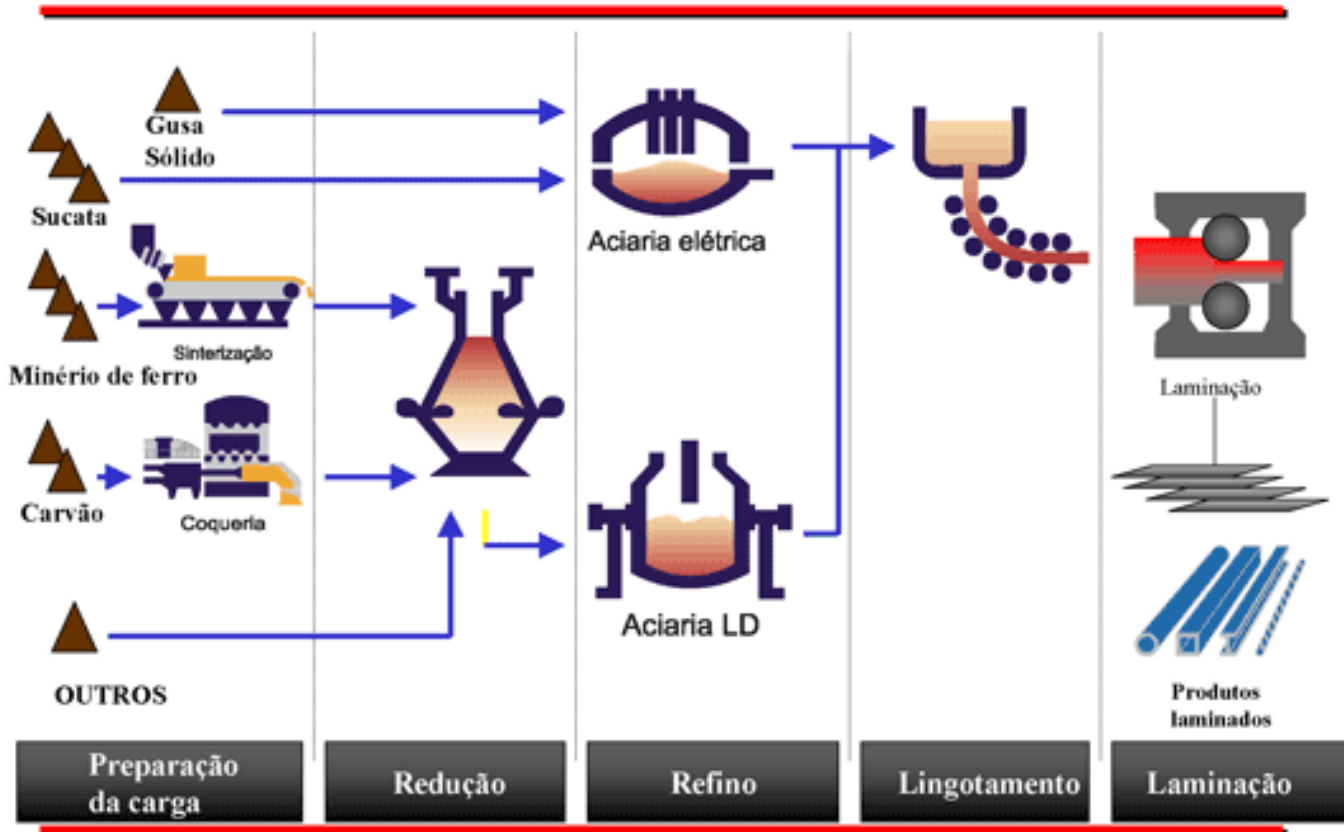


Figura 6 - Lay out das usinas integradas fonte Instituto Aço Brasil. [34]

O alto forno é um reator o qual através de reações de redução, o minério de ferro tem seus óxidos reduzidos principalmente pela ação gasosa do gás Cox produzido pela combustão do coque metalúrgico ou do carvão vegetal. O ferro gusa líquido é produzido a temperaturas em torno de 1500°C e servirá de matéria prima para a produção de aço em larga escala nos conversores ou convertedores das unidades denominadas aciarias.

3.2.1. Aspectos Internos do Alto-Forno

GANDRA [35], aborda que um dos grandes avanços no conhecimento do estado interno dos altos fornos ocorreu com as experiências de dissecação deste equipamento realizadas pelos russos e japoneses. Estas experiências indicaram a existência de cinco zonas distintas dentro dos fornos (figura 7), as mesmas estão discriminadas a seguir como:

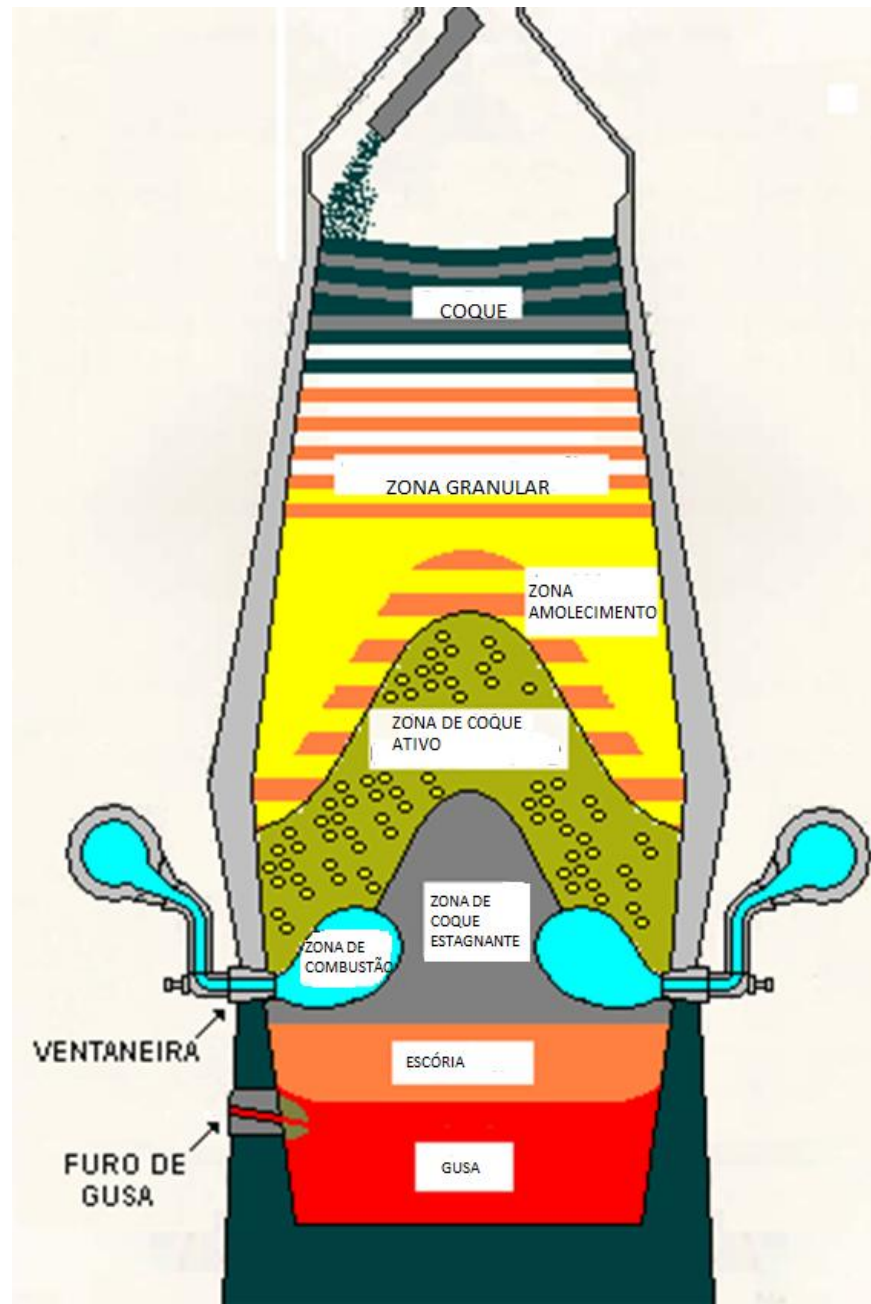


Figura 7 – Regiões do alto-forno conforme descrito por Gandra. [35]

- a) **Zona granular** : região localizada na parte superior do forno formada por camadas alternadas de combustível/redutor (coque ou carvão vegetal) e carga metálica (minério granulado, sinter e pelota), cuja configuração é mantida mais ou menos inalterada ao longo do forno;
- b) **Zona de amolecimento e fusão ou zona coesiva**: região constituída de camadas de combustível/redutor e de carga metálica semi-fundida;

- c) **Zona de coque ativo:** região composta por um leito de combustível/redutor através do qual escoam em sentido descendente, metal e escória líquidos provenientes da zona coesiva. E em sentido ascendente, os gases provenientes da região das ventaneiras. O combustível presente nesta região é continuamente consumido;
- d) **Zona de combustão (*raceway*):** consiste de uma cavidade formada em frente às ventaneiras. Nessa região ocorre a queima do combustível com o ar quente injetado;
- e) **Zona de coque estagnante:** composta por uma coluna de coque em contato com ferro gusa e escória líquidos “homem morto”. O combustível dessa região é consumido muito lentamente, através da dissolução do carbono no ferro líquido.

A produtividade e o consumo de combustível no alto forno dependem do comportamento dos gases ao atravessar essas diferentes regiões. A variação da pressão do gás, à medida que ele sobe no interior do reator apresenta perfil característico. Cerca de 60% da queda de pressão total ocorre quando o gás atravessa a zona de amolecimento e fusão. Desse modo é possível um aumento da produtividade atuando na permeabilidade desta região.

O produto denominado de ferro gusa é o material líquido que sai do alto forno a temperaturas aproximadas de 1500°C no estado líquido pelos furo de corrida cuja composição química normalmente se aproxima de 2,1 a 5 % de carbono, devido esse percentual elevado de carbono o ferro gusa possui a característica de ser frágil, o seu uso direto é como matéria prima para a fabricação de aço nos convertedores de aciaria. Outros elementos considerados como residuais são encontrados no ferro gusa como o silício, manganês, enxofre, fósforo. [35]

3.2.2. Funcionamento de um alto forno.

O alto forno é do ponto de vista físico-químico um grande trocador de calor em contracorrente e um complexo reator químico envolvendo fases sólidas, líquidas e gasosas. Os gases quentes ascendentes trocam calor e reduzem as camadas de carga metálica que se deslocam no sentido contrário. O ar preaquecido a temperaturas da ordem de 1200°C é soprado pelas ventaneiras do alto forno e entra em contato com o coque no *raceway*. O contato do oxigênio do ar com o carbono do coque aquecido a cerca de 1500°C provoca inicialmente a reação de formação do dióxido de carbono (CO₂). Essa reação altamente exotérmica, produz grande quantidade de calor para o processo.[35]

O dióxido de carbono reage com o carbono do coque formando monóxido de carbono (CO), segundo a reação de *solution loss* ou Boudouard ($C_{(s)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow 2CO_{(g)}$), endotérmica. A umidade (H₂O) contida no ar soprado reage com o carbono do coque gerando os gases redutores CO e H₂ (figura 8) e (figura 9).

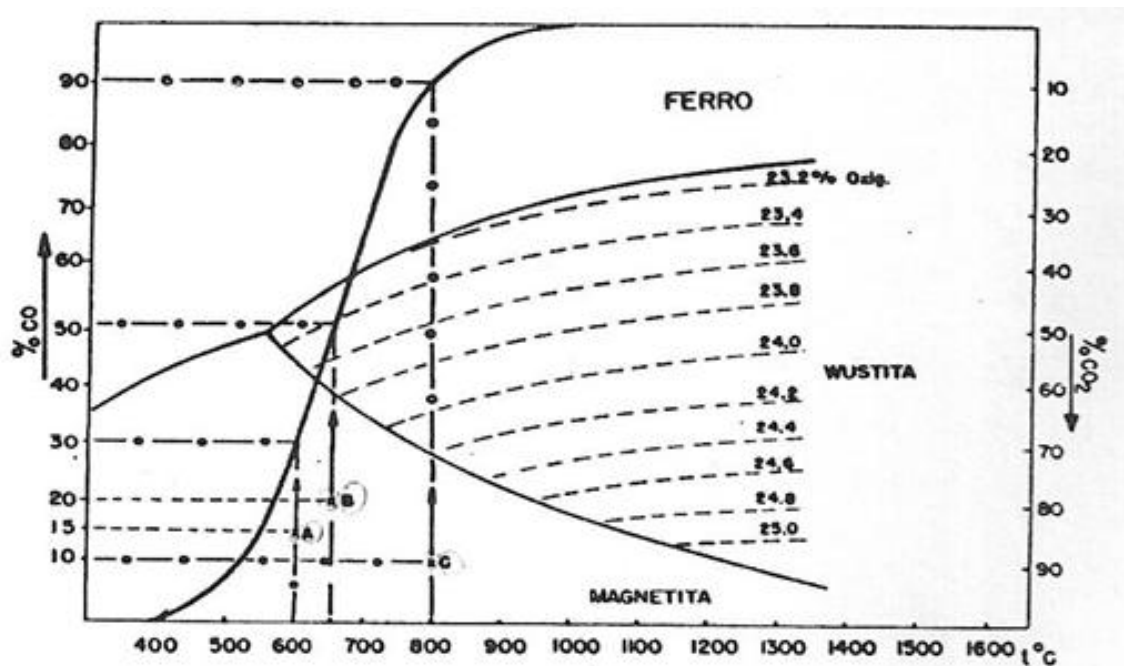


Figura 8 – Redução do óxido de ferro do minério (magnetita, wustita) pelo %CO. [36]

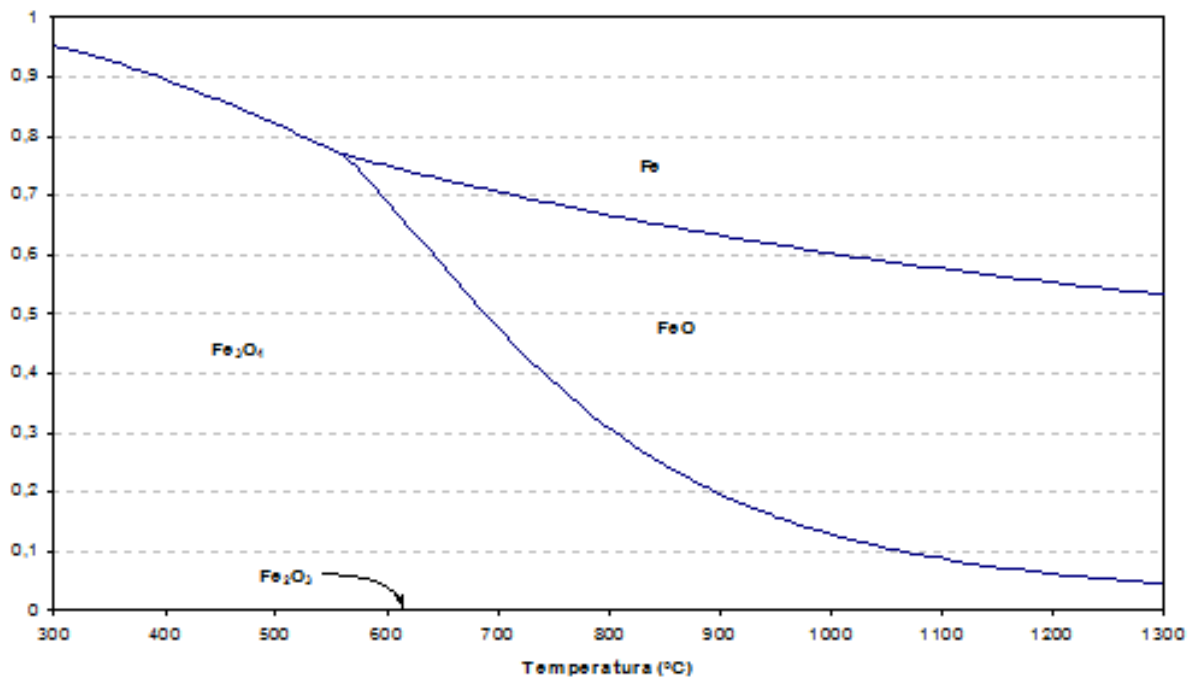


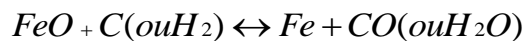
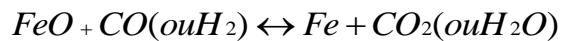
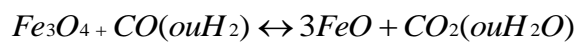
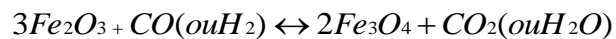
Figura 9 - Redução do óxido de ferro do minério (magnetita, wustita) pelo H. [36]

Embora essa reação também seja endotérmica o volume global de H₂O no ar soprado é baixo, o resultado efetivo relacionado a saída desses gases redutores do *raceway* é o aporte de grandes quantidades de calor para a seqüência do processo, gerando temperaturas de chama superiores a 2000°C. Durante o seu trajeto no forno o gás ascendente suprirá calor para as camadas de carga metálica descendentes, deixando o topo do forno com temperaturas da ordem de 100°C. Devido às necessidades diferenciadas de calor para uma série de reações químicas que ocorrem em vários níveis do forno, o perfil de temperaturas assume uma forma característica: uma zona superior de preaquecimento (20°C a 800°C) separada de uma zona inferior defusão (1000°C a 1500°C).

A natureza do processo de contracorrente permite que um gás altamente redutor (teor elevado de CO) entre em contato com a *Wustita* (FeO), que apresenta o menor potencial de oxigênio dos três óxidos de ferro. Posteriormente a Magnetita (Fe₃O₄) e Hematita (Fe₂O₃) são reduzidas na zona superior por um gás de menor potencial redutor.

Sendo o CO₂ o produto final da combustão do carbono, a utilização das energias térmica e química deste elemento serão tão mais completa quanto maior for a quantidade de oxigênio removida pelas reações mostradas na (equação 3). Essas reações são chamadas de redução indireta, sendo a reação global medianamente exotérmica.

Se alguma *Wustita* permanece não reduzida, ela é posteriormente reduzida por redução direta na região onde as temperaturas excedem a 1000°C.



Equação 3 – Reações de redução em alto forno [36]

Pelo fato dos altos fornos atuarem com materiais em elevadas temperaturas de trabalho como gusa e escória líquidos se faz necessário a aplicação de uma grande quantidade de cerâmicas avançadas (materiais refratários). Esses materiais resistem a elevadas temperaturas. Os materiais refratários estão localizados principalmente na área de corrida de ferro gusa e escória líquidos, onde há temperaturas de 1500°C. Eles estão presentes nos canais de corrida, na massa que é injetada nos furos, na constituição interna do cadinho dos altos fornos (tijolos de carbono), nas painéis de gusa e aço e nos carros torpedos.

Na área de corridas (figura 10) também estão localizados alguns equipamentos importantes como o equipamento responsável pela abertura do furo de corrida (perfuratriz) e a máquina de injeção de massa refratária no furo de corrida (canhão de lama).

- 1- canhão de lama
- 2- máquina perfuratriz
- 3- haste de trabalho para perfuração
- 4- acionador da tampa do canal principal
- 5- sistema de medição de nível
- 6- bica basculante

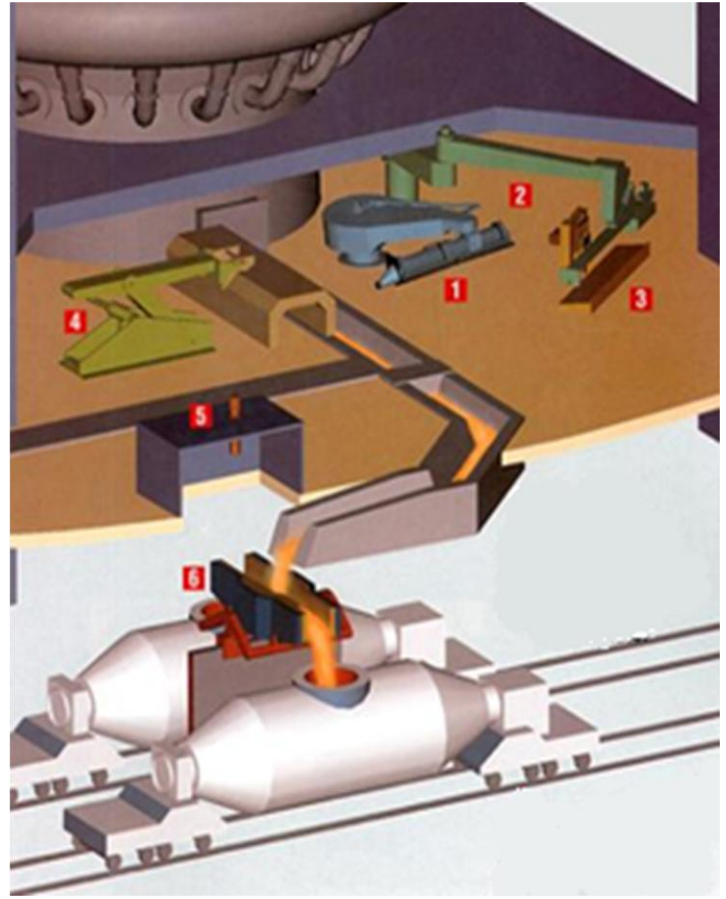


Figura 10 – *Lay out* adaptado da área de retirada de ferro gusa e escória líquida dos altos fornos (sala de corridas). [2]

3.2.3. *Furos de Corrida de Altos Fornos (furo de gusa)*

Os furos de corrida são também chamados furos de gusa (figura 11) e estão localizados na parede do cadinho, possuindo uma estrutura de revestimento refratário totalmente independente. O gusa líquido e escória são juntamente retirados pelo furo de corrida que é tamponado ao final do vazamento utilizando-se massa refratária.

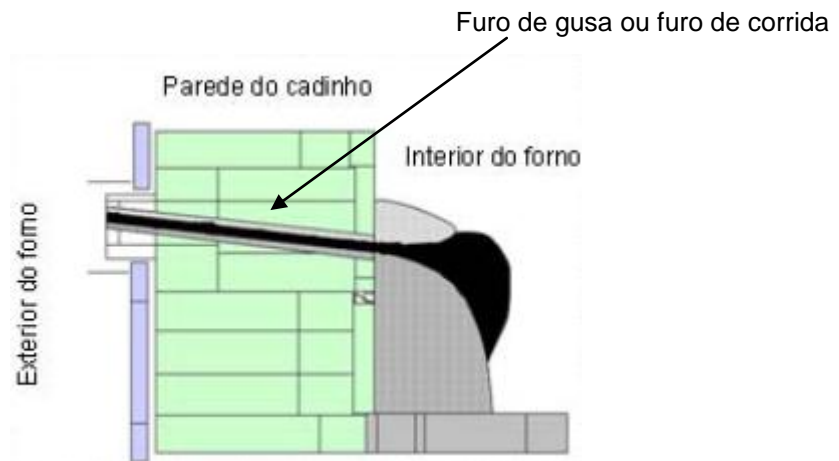


Figura 11 - Furo de corrida de ferro gusa em altos fornos (furo de gusa) [35]

Os grandes altos-fornos na maioria das vezes operam com dois furos de corrida (figura 12), sendo que um é aberto logo após o outro ter sido tampado. Desta forma no início da corrida é pouca a quantidade de gusa no interior do cadinho desde que o forno esteja bem esgotado. Além disso o diâmetro do furo é pequeno, praticamente igual ao diâmetro da broca utilizada em sua abertura. Assim a vazão de saída no início do vazamento é menor que a taxa com que o gusa e escória são produzidos pelo alto-forno. Conseqüentemente as quantidades de gusa e escória no cadinho aumentam em um dado intervalo de tempo.

Com o aumento do diâmetro do furo provocado pelo desgaste da saída do material líquido do cadinho, a vazão de saída excede a taxa de produção possibilitando o esgotamento do forno e provocando escape de gases no final da corrida. Então o furo deve ser fechado devido o volume dos gases que saem pelo mesmo ser consideravelmente maior que o volume de ferro gusa e escória.

A partir destas considerações prevê-se que um alargamento do furo acima do normal resulta em aumento da vazão com conseqüente tamponamento prematuro. Este fenômeno ocorre devido a pequena diferença no nível entre o furo de corrida e o nível de gusa no cadinho. Para furos muito longos com pequenos diâmetros o gusa e a escória separam-se em duas camadas. O gusa é vazado primeiro e apenas quando a camada de escória se torna muito espessa ela é vazada. Isso ocorre devido a necessidade de drenar o ferro gusa situado nas regiões inferiores para acessar a camada de escória. A escória por ser menos densa sempre se posicionará acima do nível de ferro gusa.

Estratégias especiais de corrida devem ser adaptadas de acordo com o estado do forno em busca de se produzir uma consistente e suficiente drenagem do

cadinho. Em diversos altos-fornos regras simples são aplicadas para procedimento de corridas baseado em critérios como tempo entre corridas, e tempo de aparecimento de escória. Essas regras são efetivas durante operação normal. Entretanto em períodos com distúrbios no processo (como excessivo acúmulo de escória), o procedimento de corrida deve ser mudado de acordo com o real nível de líquido no cadinho. O aumento na produtividade do alto-forno e otimização dos procedimento de corridas (por exemplo a redução do número de corridas por dia) requerem informações mais detalhadas do nível de líquidos no cadinho. Baseado nessas informações temos o importante papel de se controlar o furo de gusa e em consequência, de se manter a vazão na drenagem do cadinho.

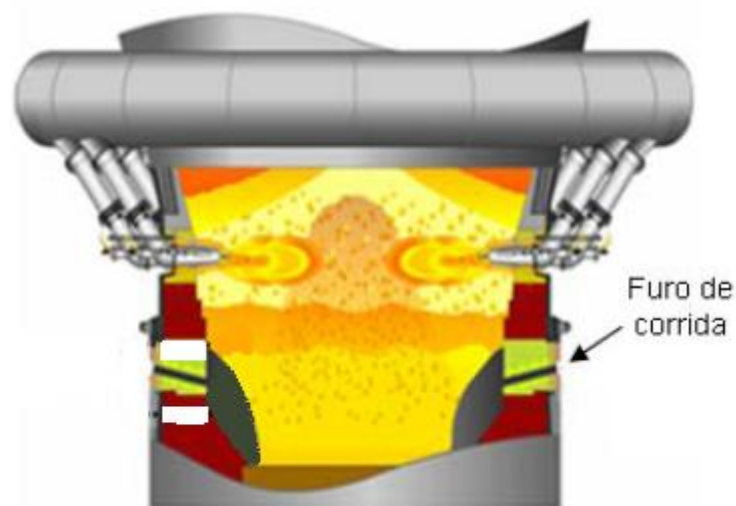


Figura 12 - Esquema com as principais regiões do alto-forno destacando a posição do furo de corrida.

[35]

3.2.3.1. Efeito dos furos de corridas no nível de líquidos no cadinho

O cadinho é parte extremamente importante na operação do alto-forno, uma vez que é nessa região onde o produto gusa assume sua temperatura e composição final. Essa é a parte do forno onde o líquido é coletado e por onde ocorre a saída dos mesmos. O cadinho é a que define a campanha (vida útil) e a estabilidade operacional do reator. É importante destacar que os fenômenos de transporte e a situação física do cadinho são complicados e de difícil caracterização e monitoramento. A heterogeneidade do fluxo, a transferência de energia, e a dissolução de carbono do refratário e do coque causam enormes diferenças nas condições térmicas e na composição do gusa. É imperativo que o interior do cadinho

tenha suficiente volume e permeabilidade para manter uma drenagem sem distúrbios e uma corrida controlada. Dependendo das condições do homem morto, assentado ou flutuando ocorrem mudanças nas condições físicas e térmicas do cadinho, afetando o desgaste refratário. Além disso, a situação do núcleo do forno é muito importante para a qualidade do gusa. A produção de ferro-gusa e escória é contínua enquanto que a retirada em alguns casos é feita em intervalos. Ocorrendo o acúmulo de materiais no cadinho. O estado do cadinho afeta a distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Ti) entre gusa e escória e também a carbonização do ferro. O esgotamento do cadinho é um fator especialmente crítico se a produtividade do forno é aumentada. Desta forma o controle da drenagem se torna de grande importância uma vez que um cadinho com baixo nível de líquidos é essencial para a boa operação do forno.

Durante uma operação de corrida existe uma tendência geral de se ter maior esgotamento do gusa em relação à escória. Isto pode ser explicado em função da menor viscosidade do gusa. É consenso que algumas flutuações no comportamento do alto forno podem ser explicadas pelo acúmulo de líquidos no cadinho. Esse acúmulo exerce influência sobre a descida da carga, é possível observar que há um aumento na pressão de sopro durante o período entre dois vazamentos, sendo que a pressão cai ao longo da corrida, (figura 13). Esse acréscimo na pressão de sopro é decorrente do acúmulo de líquidos no cadinho que faz com que o nível de escória aumente e atinja alturas superiores ao nível das ventaneiras. Oscilações de pressão de até 0,2 atm já foram observadas em alguns altos-fornos. [35]

A equação seguinte (equação 4) mostra que a pressão no interior do alto forno é inversamente proporcional ao volume interno, elevadas taxas de produtividade somente são atingidas com índices de pressão dentro de faixas de trabalho controladas. O esgotamento do cadinho é um dos fatores necessários ao controle da pressão interna do alto forno.

$$\frac{DP}{V} = \frac{Psopro - Ptopo}{VS}$$

Equação 4 – Diferencial de pressão no interior do alto forno [32]

Onde: DP - Diferencial de pressão; V - Volume interno; VS - Volume de sopro; P - Pressão.

Onde que:

DP : Diferencial de pressão;

V: Volume interno (m^3);

VS: Volume de sopro (N/m^3);

P: Pressão (bar);

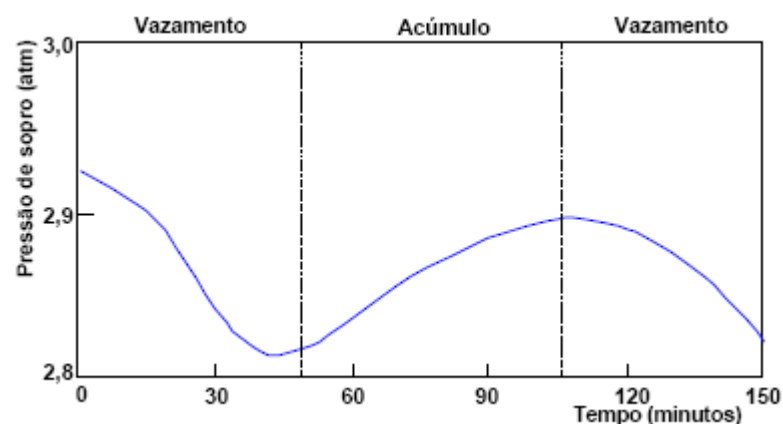


Figura 13 – Variação na pressão de sopro do ar em função do ciclo de vazamento de gusa e escória, segundo Kitaev *et. al.* citado por Gandra e Castro [35] [36]

Acima podemos verificar que após iniciar a corrida de ferro gusa e escória pelo furo de gusa (vazamento) a pressão interna do alto forno começa a diminuir, até o momento em que o furo de corrida é fechado (injetado massa refratária pelo canhão de lama – máquina de injeção de massa refratária no furo de corrida). Neste dado momento onde o gráfico acima o cita como (acúmulo), as pressões internas dentro do alto forno começam a aumentar novamente e assim sucessivamente em ciclos alternados de vazamentos e acúmulos.

Além dos importantes efeitos sobre a pressão de sopro e a vazão de ar o nível de líquidos no cadinho afeta também o estado do núcleo do reator. Juntamente com as próprias características dos materiais líquidos o homem morto (que recebe esse nome devido ao longo período de residência do coque dentro do alto forno) é responsável pela permeabilidade/movimentação do fluxo no interior do cadinho. Sua flutuação ou não depende do equilíbrio de forças entre empuxo (o coque é muito mais leve que o metal) e o peso da carga. Na análise das seções de dois altos-

fornos dissecados, (figura 14). Pode-se observar que em um dos fornos o homem morto está flutuando (a) enquanto que no outro ele está apoiado no fundo do cadinho (b).[36]

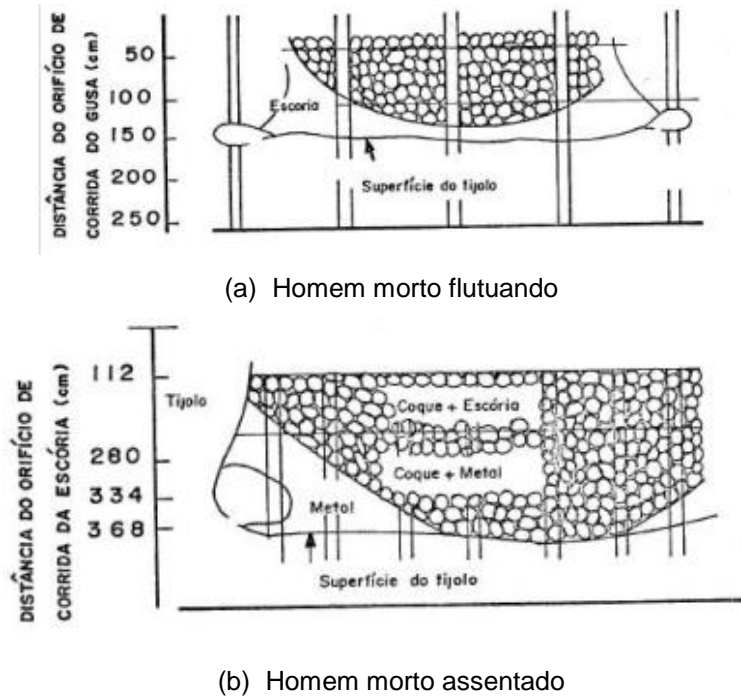


Figura 14 – Seção vertical do cadinho com posições distintas do homem morto ,AF5 - Higashida (a) e AF4 – Kukioka (b) segundo Kambara *et al.*, citado por Figueira *et al.* [36]

Como indicado anteriormente a posição do homem morto é função do balanço de forças atuando nele, (figura 14). A penetração do leito de combustível na escória e no gusa é determinada pelo peso da carga (equação 5) sólida e pelas forças de empuxo de gás e líquidos (figura 15).

$$W = (\rho_{hm} - \rho_c)(1 - \varepsilon)H_{hm} + (\varepsilon_{sl} - \varepsilon_c)(1 - \varepsilon)H_{sl}$$

$$\varepsilon = \frac{0,0981 * G * \frac{1 + SR}{1000}}{A * \frac{dp}{dt}}$$

Equação 5 – Peso da carga dentro do cadinho do alto forno [35]

Onde que:

ε : Fração de vazios do leito, dentro do cadinho ;

dP/dt : Variação da pressão (bar/h);

G : Produção, obtida pelo balanço de oxigênio (t/d);

A : Área do cadinho (m^2);

SR : *Slag-rate* (kg/t);

V_{HM} : Volume de metal presente no cadinho (m^3);

H_{HM} : Espessura da camada de metal, com coque (m);

H_{SL} : Espessura da camada de escória, com coque (m);

W : Peso da carga (t/m^2);

ρ_{HM} : Densidade do metal (kg/m^3);

ρ_C : Densidade do coque (kg/m^3).

O peso da carga sólida aumenta com a altura do leito de partículas e com o aumento da carga metálica em relação ao combustível. A força de empuxo dos líquidos aumenta com a penetração do combustível nas camadas de escória e gusa.

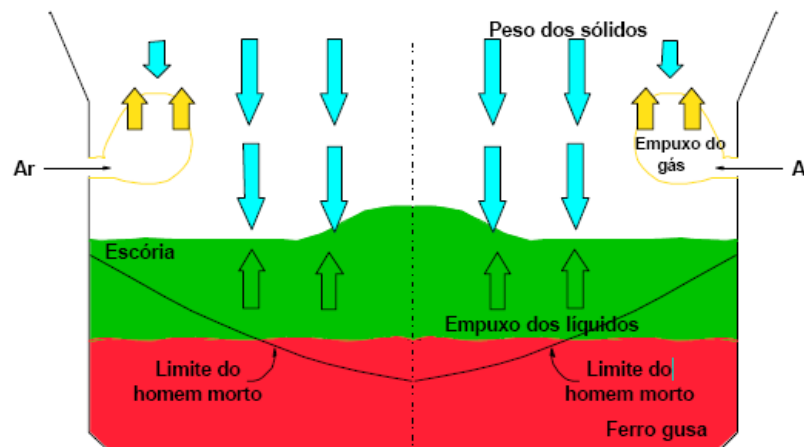


Figura 15 – Vista esquemática das forças atuantes no cadinho de um alto forno e que determinam a posição do homem morto. [35] [36]

Quanto maior for o nível de líquidos no cadinho, mais alta é a possibilidade do homem morto flutuar. Assim as condições de drenagem do cadinho afetam também o estado do homem morto.

3.3. Massas de Tamponamento (Massa refratária injetada nos furos de gusa)

Massas de tamponamento para altos fornos são massas refratárias específicas formuladas quimicamente para obturar, fechar ou tamponar o furo que retira o ferro gusa e escória líquidos de dentro do cadinho do alto forno.

Essas massa devem ter características tais que resistam a elevadas temperaturas em contato com o material líquido oriundo do interior do alto forno, e as pressões envolvidas no processo. Essas massas quando injetadas pelas máquina de injeção de massa refratária em furos de corrida intituladas “canhão de lama” são submetidas a pressões de trabalho em torno de 150 a 200kg/cm². [37]

3.3.1. Análise Sistêmica das Massas de Tamponamento

Ribeiro [37] menciona que o elevado aumento na produção mundial de aço observado principalmente a partir do final da década de 90, gerou um crescimento significativo na indústria de fabricação de ferro gusa via altos fornos em usinas Nacionais. A produção de ferro gusa via alto forno oferece vantagens sobre os demais processos disponíveis para a redução do minério de ferro, principalmente custo competitivo e elevadas taxas de produtividade. Em usinas siderúrgicas integradas aquelas em que o aço bruto é obtido a partir do minério de ferro, reduzido na própria indústria através de altos fornos, a logística de cada etapa da produção é de extrema importância para que os custos de produção sejam minimizados e o produto final seja fornecido dentro dos prazos previstos.

Com relação aos altos fornos um ponto crítico de seu processo está relacionado à massa refratária utilizada para vedar (tamponar) o furo de corrida, que é por onde ocorre o vazamento de gusa e escória líquidos. Essa massa de tamponamento é de extrema importância para todo o fluxo de produção de uma usina integrada nos altos fornos ela é responsável por : controlar um vazamento estável de gusa e escória, proteger toda região interna do forno que é agressivamente atacada aumentando sua vida útil, por facilitar as operações de abertura e tamponamento do alto forno tornando-as também mais seguras. Os fatores abordados anteriormente tornam a massa de tamponamento um produto produto essencial na rota de produção do gusa líquido e, por consequência, na produção de aço. Uma falha desse

produto como excessivo desgaste durante vazamento, pode comprometer toda a logística de uma usina integrada uma vez que o furo de corrida deverá ser fechado prematuramente e não haverá gusa líquido suficiente para completar o volume útil do carro torpedo impedindo o de ser encaminhado para a aciaria.

Essa quantidade insuficiente de gusa no carro torpedo deverá aguardar até o próximo vazamento para que o volume útil seja atingido. Outra situação indesejada que pode ocorrer com a massa de tamponamento é o não vedamento (tamponamento) perfeito do furo durante um intervalo de corrida. Isso pode levar a um rompimento inesperado do furo, com liberação de material altamente aquecido do interior do forno danificando toda a região da sala de corrida e comprometendo a segurança operacional dessa região. Outro fator ligado à massa de tamponamento que também influencia no perfeito sincronismo na produção do aço, é a dificuldade de abertura do furo devido a alguma eventual dureza excessiva da massa. Tal fato leva ao atraso do vazamento do ferro gusa, culminando em um retardo na fabricação do aço e aumento do seu custo de produção. Além da massa de tamponamento ser extremamente importante para a logística de produção de aço esse é um produto de grande complexidade uma vez que é composto por inúmeras matérias primas, que possuem funções distintas e essenciais para uma perfeita aplicação e utilização. A massa de tamponamento é um produto dinâmico que após fabricação sofre constantes transformações, modificando suas propriedades principalmente sua plasticidade. Uma transformação significativa à qual a massa está sujeita ocorre no momento de sua aplicação no furo de corrida que se encontra a uma temperatura elevada. Nesse momento, todo o material que é responsável pela plasticidade da massa (piche e/ou resina) é eliminado à medida em que esta preenche o furo e começa a sinterizar.

Diversas reações químicas são desencadeadas na massa afim que esta preencha perfeitamente o furo aderindo à massa remanescente e na parte mais inferior do forno (cadinho) ela diminui o desgaste da região provocado pelo gusa e escória que se encontram líquidos e em elevadas temperaturas.

Estudos abordando o tema massas de tamponamento sempre ficaram muito restritos às empresas, devido à complexidade do produto e aos cuidados em sua fabricação relativos às matérias primas de sua composição (tabela 1), que são nocivas à saúde humana. A elevada competitividade entre os fabricantes também restringiu a divulgação de trabalhos mais detalhados relacionados às propriedades

das massas de tamponamento. As publicações existentes sempre abordaram o assunto de uma forma superficial e sem um aprofundamento técnico satisfatório, possivelmente devido às inúmeras variáveis que compõem este complexo sistema das massas de tamponamento. [37]

Tabela 1 - Principais matérias primas na massa tamponamento. [37]

	MATÉRIAS-PRIMAS	FUNÇÕES PRINCIPAIS
Agregados	Alumina fundida	Agregados de base, refratariedade. Melhora a estabilidade volumétrica da massa.
	Chamote calcinado	Agregados de base, refratariedade. Melhora a estabilidade volumétrica da massa.
	Argilo-mineral	Melhora a plasticidade e adesão da massa na parede do cadinho. Promove a sinterização por agir como ligante cerâmico.
	Cianita	Expansão (>1200 °C).
	Agalmatolito	Promove expansão entre 800 e 1200 °C e aumenta a plasticidade da massa facilitando sua injeção no FG.
	Alumina-zircônia	Aditivos especiais para prevenir spalling e corrosão.
Fontes de carbono	Grafita	Resistência à corrosão, facilita injetabilidade
	Negro de fumo	Resistência à corrosão / erosão, vedação de trincas.
	Finos de coque	Aumenta a porosidade / permeabilidade, facilitando o desprendimento de voláteis e perfuração. Aumenta a resistência à corrosão.
	Piche sólido	Reduz a porosidade e em consequência a infiltração de escória.
Aditivos especiais	Carbeto de silício	Resistência à corrosão. Contribui para reduzir a oxidação dos outros materiais carbonáceos.
	Nitreto de ferro silício	Resistência à erosão / corrosão.
Pós-metálicos (anti-oxidantes)	Alumínio, silício, ferro-silício	Contribui para reduzir a oxidação dos materiais carbonáceos. Resistência à erosão. Garante melhor sinterabilidade e aumento da resistência mecânica a quente.
Ligantes	Piche / resina / óleos especiais	Ligantes; aglomerantes; coesão; injetabilidade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os materiais estudados neste trabalho foram proteções cerâmicas comerciais a base de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ e $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ (figura 16 e 17), ambos fabricados pela empresa Morganite do Brasil, Itaguaí-RJ. A especificação química básica dos produtos é apresentada na (tabela 2).



Figura 16 – Amostra proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.



Figura 17 – Amostra proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

Tabela 2 - Especificação dos produtos utilizados neste trabalho (dados do fornecedor).

Faixa Composicional (% peso)	Proteção Cerâmica: CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	Proteção Cerâmica: SiO ₂ -MgO-CaO
Al ₂ O ₃	48	0,8
SiO ₂	52	62-68
CaO	Balanço	26-32
MgO	0	3-7
Outros/Impurezas	<1	<1

O processo de fabricação da proteção cerâmica a base de SiO₂-MgO-CaO pode ser definido basicamente da seguinte forma:

4.1.1 Fabricação da manta cerâmica

A mistura de pós com composição previamente determinada foram carregadas no cadinho do forno de indução, os pós constantes nesta mistura são determinados de modo a proporcionar a composição química esperada na manta cerâmica.

Após o forno ser ligado ele atinge temperaturas em torno de 2400°C, necessárias para a fusão dos pós cerâmicos que exigem elevadas temperaturas para mudança de seu estado físico, devido sua elevada refratariedade. Após atingir a temperatura e o tempo de fusão o forno recebe o “*Radial Blowing*” (Sopro Radial) que produz determinadas quantidades de “*plumas*”.

Essas “*plumas*” fabricadas a partir dos pós fundidos são arrastadas pela pressão negativa até um complexo sistema de esteiras onde as mesmas se acomodam, após essa acomodação temos a manta cerâmica propriamente dita. A manta previamente fabricada é conduzida pela esteira até um sistema de entrelaçamento em uma máquina equipada com um conjunto de agulhas, essas agulhas proporcionam compactação e o entrelaçamento determinando a densidade da manta final (figura 18).



Figura 18 – Manta cerâmica em lâmina.

4.1.2 Fabricação da proteção cerâmica

Após fabricadas conforme descrito, as mantas cerâmicas foram trituradas e diluídas de modo a formar uma barbotina.

A barbotina é carregada em um tanque de 2000 m³ onde é inserido o molde com as dimensões da proteção cerâmica desejada. Esse molde é previamente fabricado com as dimensões da parte frontal da máquina de injeção de massa nos furos de corrida de ferro gusa. Após a inserção do molde no banho é iniciado o processo de sucção a vácuo. Todo o líquido passa pelo molde que retém em suas malhas as minúsculas partículas sólidas permitindo a passagem somente da fase líquida. Após a passagem por um determinado tempo da fase líquida pelo molde temos a forma desejada sólida retida dentro do molde.

A proteção cerâmica na sua forma sólida moldada, posteriormente é levada para um processo de secagem a temperatura de 100°C. Depois da referida secagem a mesma está pronta para a utilização industrial a qual foi fabricada. Abaixo segue o desenho da parte frontal da máquina de injeção de massa “*canhão de lama*”, que originou o molde da proteção cerâmica (figura 19).

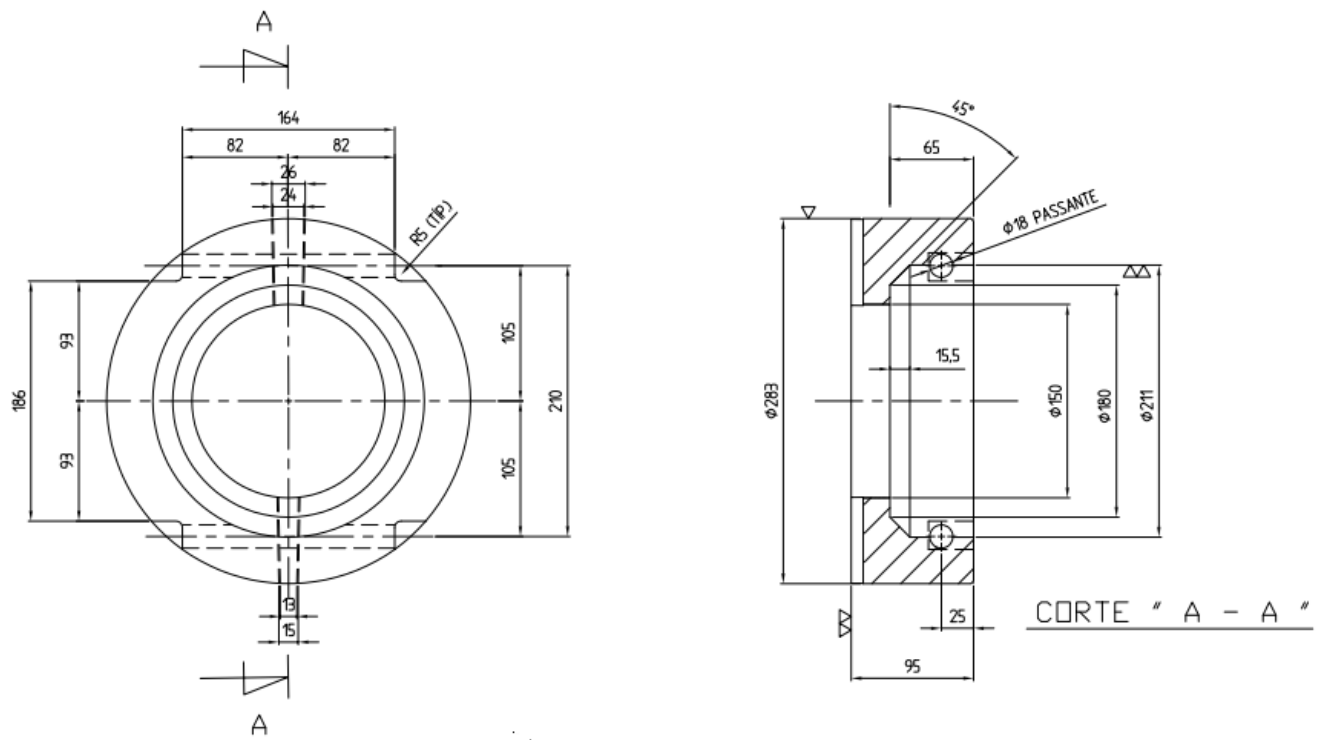


Figura 19 - Desenho parte frontal da máquina de injeção usado para dimensionar o molde. [38]

4.2. Métodos

Estão descritos a seguir os métodos utilizados para viabilizar a substituição da proteção cerâmica de composição $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ pela nova proteção cerâmica fabricada a partir do composto $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$. A substituição foi direcionada de maneira a obter os mesmos resultados operacionais. Esses resultados se baseiam principalmente na preservação da integridade da parte frontal, da máquina de injeção de massa refratária nos furos de corrida de ferro gusa e escória de altos fornos, com menor custo.

Os métodos utilizados são:

- Análise dos diagramas ternários dos elementos químicos das proteções cerâmica;
- Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e caracterização por difração de Raio - X;
- Caracterização das densidades;
- Testes de campo.

4.2.1 Análise dos diagramas ternários dos elementos químicos das proteções cerâmica.

Foi realizado a análise da temperatura *liquidus* da proteção cerâmica do composto $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$. Conforme o diagrama de fases apresentados na (figura 20), as composições químicas descritas obtiveram temperaturas em torno de 1600°C atendendo o requisito térmico necessário ao emprego da proteção cerâmica a base de sílica como material protetor para a máquina de injeção de massa nos furos de retirada de ferro gusa e escória líquida.

System CaO - MgO - SiO₂

Região de temperatura de trabalho da composição química da proteção cerâmica a base de SiO₂(62-68)-MgO+CaO(29-39) 1600°C.

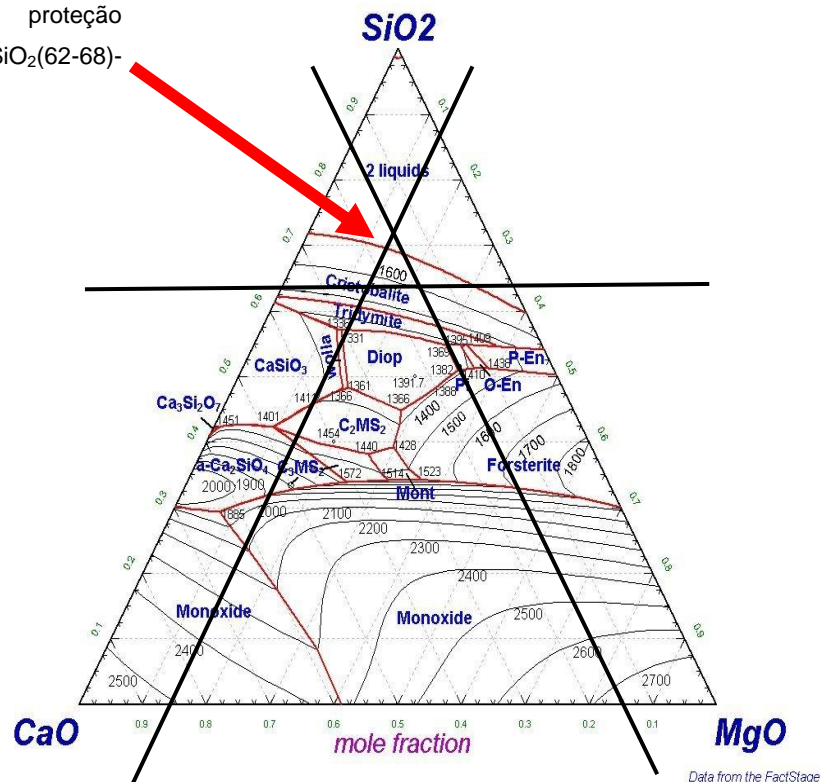


Figura 20 - Diagrama ternário SiO₂(62-68)-MgO+CaO(29-39).[39]

4.2.2 Caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Difração de Raios – X.

As proteções cerâmicas a base de sílica (SiO₂) e a base de alumina (Al₂O₃) foram caracterizadas por Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As amostras foram cortadas e fragmentadas, sendo submetidas a análise de fases cristalinas. As fases presentes foram identificadas utilizando difratômetro SHIMADZU XRD-6100, aplicando-se radiação Cu-Kα com varredura entre 10° e 80°, com passo de 0,05° e velocidade de 3s/ponto de contagem. Os picos das fases cristalinas foram identificados, através de comparação com microfichas do arquivo JCPDS [40]. As micrografias foram obtidas utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV). Pequenos fragmentos das proteções cerâmicas foram avaliados

em Microscópio Eletrônico de Varredura HITACHI TM3000, em diferentes ampliações. Para efeito comparativo, ambos os materiais foram analisados nas mesmas ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x, 4000x e 7000x.

4.2.3 Caracterização das densidades das proteções cerâmicas.

Realizado análise das densidades da proteção cerâmica a base de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ e a base de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

As análises foram executadas na balança de precisão analítica Sartorius, modelo TE 214S, calibração executada em 15 de abril de 2014 pela empresa IMATEB, número de certificado 006.304, capacidade máxima 210 gramas e precisão de quatro casas decimais (figura 21).



Figura 21 – Balança Analítica Sartorius.

As amostras previamente cortadas e pesadas, foram submetidas a determinação de suas respectivas densidades (figura 22).

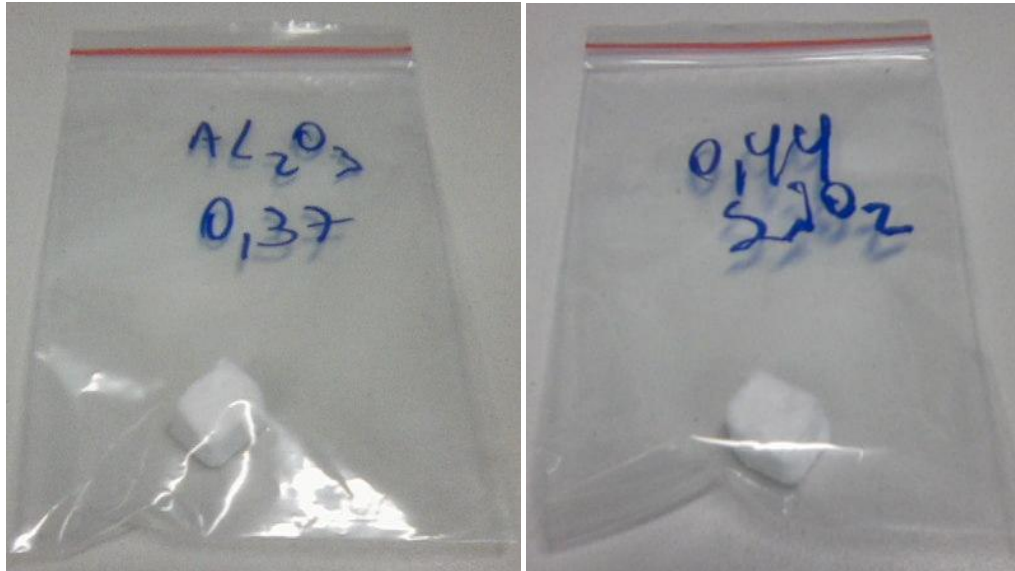


Figura 22 – Amostras de proteção cerâmica a base de CaO-Al₂O₃-SiO₂ e SiO₂(62-68)-MgO+CaO(29-39) com seus respectivos pesos em grama.

4.2.4 Testes em Campo da Substituição das Proteções Cerâmicas.

As proteções cerâmicas de SiO₂(62-68)-MgO+CaO(29-39) foram aplicadas na parte frontal da máquina de injeção de massa, dos altos fornos n^o1 e n^o2, da empresa CSA - Companhia Siderúrgica do Atlântico – Thyssen Krupp. Foram utilizadas 05 proteções cerâmicas de SiO₂(62-68)-MgO+CaO(29-39).

Antes da realização dos testes das proteções foram passadas informações em reunião para os operadores envolvidos sobre a composição do novo material e o que estaria sendo desenvolvido no mesmo.

As referidas proteções foram colocadas a prova após a realização de uma corrida completa de vazamento de gusa. As amostras tiveram como parâmetro analisado, o isolamento e a existência ou não de fusão da parte frontal da máquina de injeção de massa.

A (figura 23) nos mostra o procedimento executado para a realização dos testes de campo com a proteção cerâmica SiO₂(62-68)-MgO+CaO(29-39), assim como as ações de segurança e as atividades a serem executadas.

Todo o pessoal envolvido foi treinado no procedimento antes da execução dos testes terem sido iniciados de acordo com as normas de segurança e operacionais da ThyssenKrupp Siderúrgica do Atlântico.

1. Objetivo

Desenvolver novos fornecedores de proteção cerâmica para o bico falso (camisinha).

2.Responsabilidades

O operador de produção / Supervisão da sala de corridas.

3. Material de Referência

Não aplicável

4. Definições

Abreviação/ Nome do documento/ Termo Técnico	Significado / Definição
AF	Alto Forno

5. Ferramentas ou Equipamentos Requeridos

NA.

6. Segurança:

Não ficar diante do raio de giro do canhão.

Utilizar luva para montagem da proteção cerâmica.

Atenção ao deslocamento de carga suspenças e trânsito de equipamentos móveis.

7. Atividades:

- a- Limpar o bico do canhão removendo toda material sinterizado.
- b- Abastecer o canhão
- c- Instalar a proteção cerâmica no bico do canhão.
- d- Preencher relatório de avaliação.

Figura 23 – Procedimento para execução de testes de campo com a proteção cerâmica de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$. [41]

Os dados referentes aos testes executados na ThyssenKrupp – CSA Siderúrgica do Atlântico originaram uma planilha de campo figura (24). Nela estão sinalizados os dados gerados no momento da injeção de massa no furo de corrida conforme descritos a seguir.

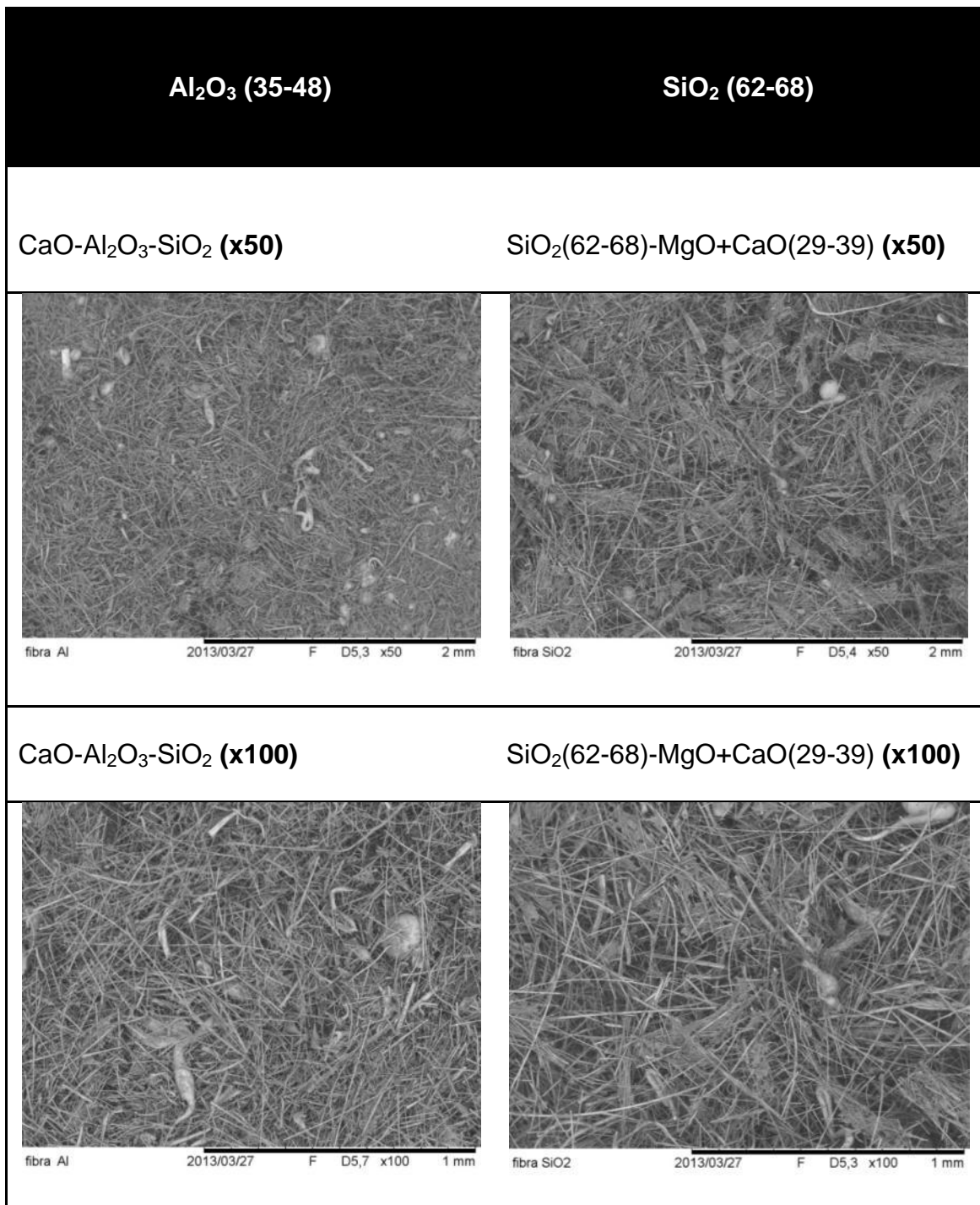
**Relatório de avaliação
Teste de Proteção Cerâmica**

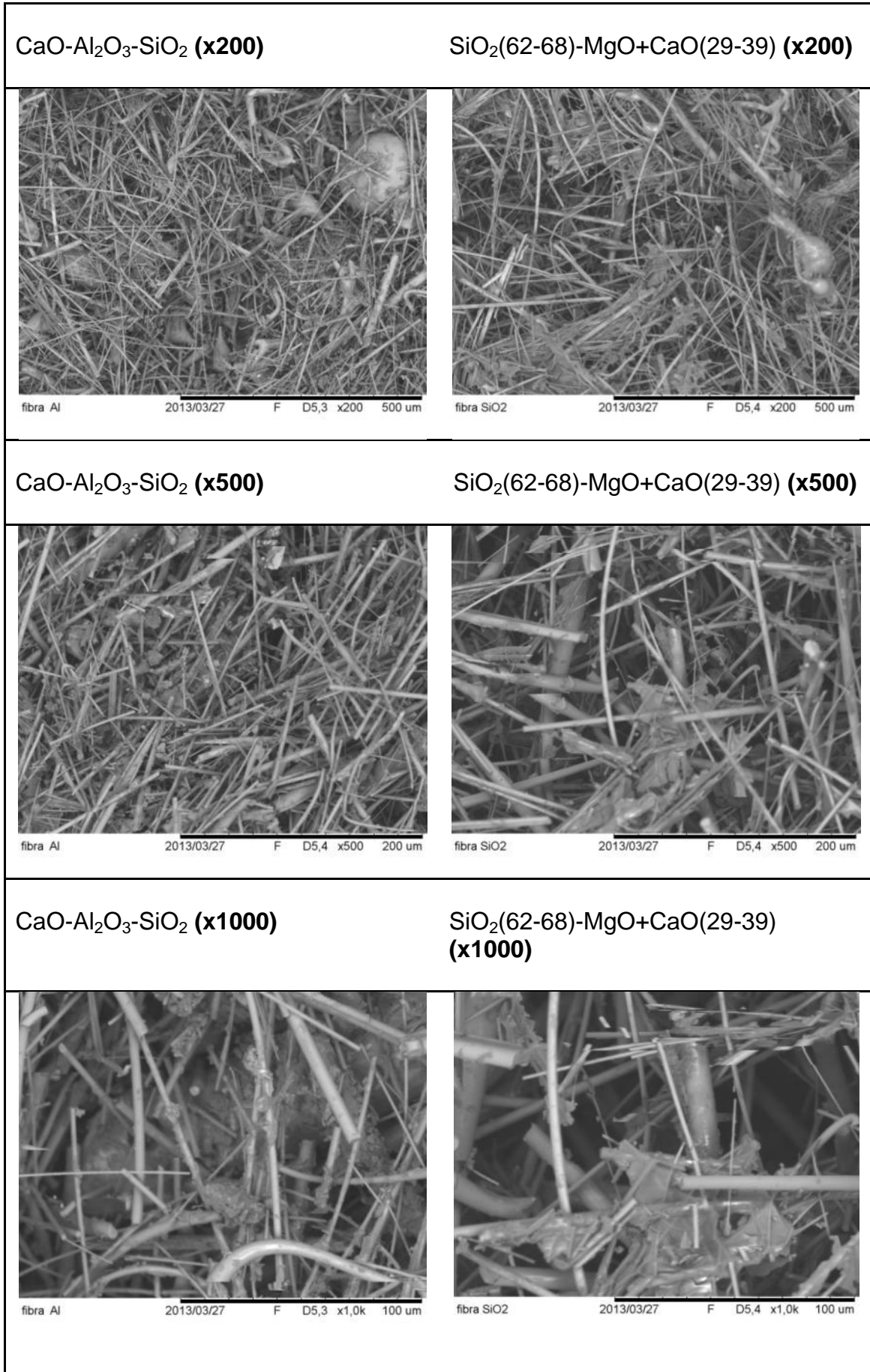
Data	AF	FG	Encaixe da proteção cerâmica no bico do canhão		N° do Fechamento da corrida	Tipo de fechamento			Queima do bico		OBS
			OK	NOK		Bom	VM	NI	sim	não	
29/12/11	2	1	X		2691	X				X	(AMOSTRA 1) PESO 1273kg
29/12/11	1	2	X		3561	X				X	(AMOSTRA 2) PESO 1087kg
23/12/11	1	1	X		3562	X				X	(AMOSTRA 3) PESO 1365kg
29/12/11	2	2	X		2692	X				X	(AMOSTRA 4) PESO 1290kg
29/12/11	1	1	X		3563	X				X	(AMOSTRA 5) PESO 1169kg

Figura 24 – Planilha usada para acompanhar os testes de campo.[41]

5 RESULTADOS

São mostradas (figura 30), as imagens relativas aos dois tipos de proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ e $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, em comparação em seus respectivos aumentos realizados. Essas imagens foram oriundas da Microscopia Eletrônica de Varredura.





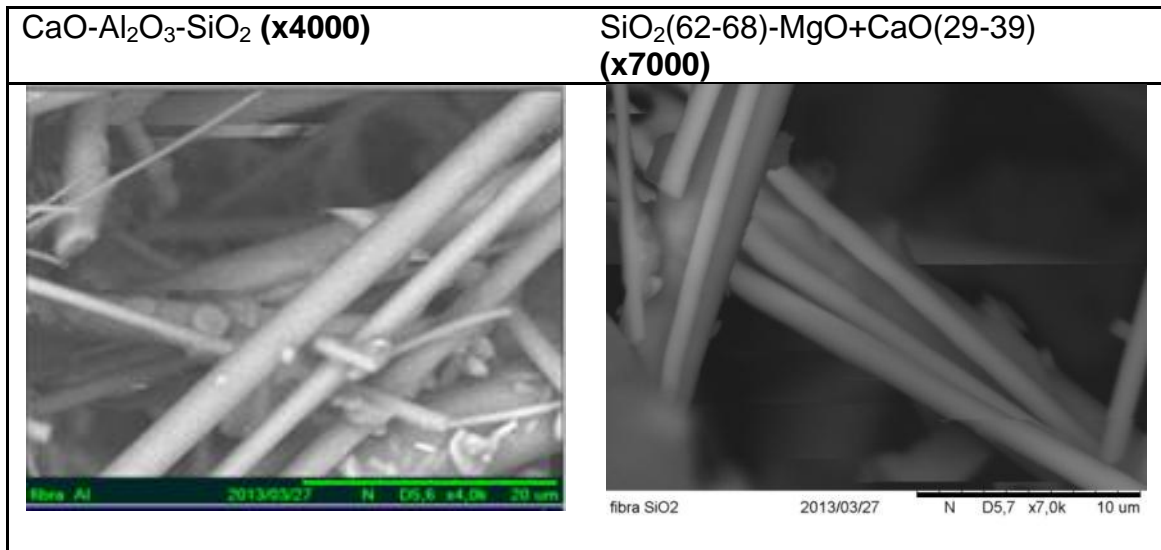


Figura 25 - Microscopia Eletrônica de Varredura dos compostos $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ e $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

Nas imagens geradas o material se apresentou totalmente fibroso e amorfo em todos os aumentos gerados na microscopia eletrônica de varredura.

Analisando os aumentos de 50x, 100x, 200x, foi verificado que o composto $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ possui uma quantidade maior de fibras comparado ao composto $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$. Tal fato pode ser visualizado melhor no aumento de 500 vezes, onde é nítido o quantitativo maior de fibras na primeira imagem.

Nos compostos $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (x500), $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ (x500) a morfologia das fibras se apresentaram com arestas capazes de promover lesões no aparelho respiratório caso se inaladas, esse fato pode ser constatado com maior clareza visualizando o aumento do composto $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (x4000). As imagens nos permitem a assegurar que o novo composto $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ possui uma quantidade menor de fibras relacionado ao composto anterior utilizado. Conseqüentemente há uma probabilidade menor de provocar danos ou lesões no aparelho respiratório por inalação. Até o aumento de (x200) foram visualizados núcleos de fibras mal elaborados em ambos os compostos, em aumentos superiores não foi realizado visualização destes núcleos.

A (figura 31) e (figura 32) apresentam os resultados de Difração de Raios-X das amostras do composto rico em SiO_2 e Al_2O_3 , respectivamente.

Através da DRX foi verificado que as duas proteções são constituídas de material amorfo. Na proteção de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ (figura 31) quase não foi identificado início de formação de cristais de Al_2O_3 . Na proteção cerâmica

anteriormente utilizada $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ foi observado o início da formação de cristais (cristalização) de alumina alfa, (figura 32).

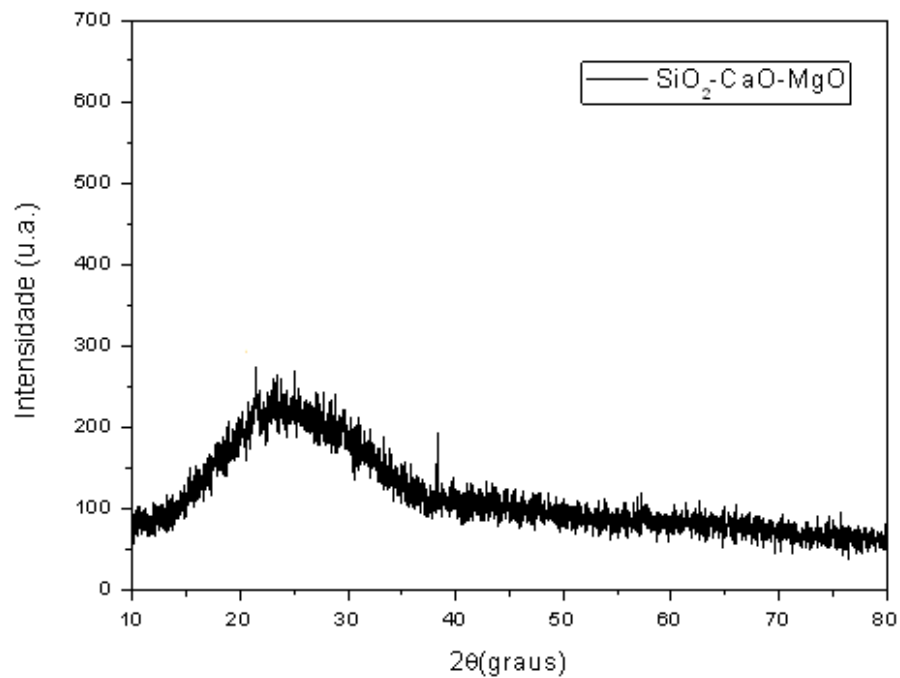


Figura 26 – Difratoograma gerado através da amostra da proteção cerâmica de composição $\text{SiO}_2(62)\text{-MgO+CaO}(29\text{-}39)$

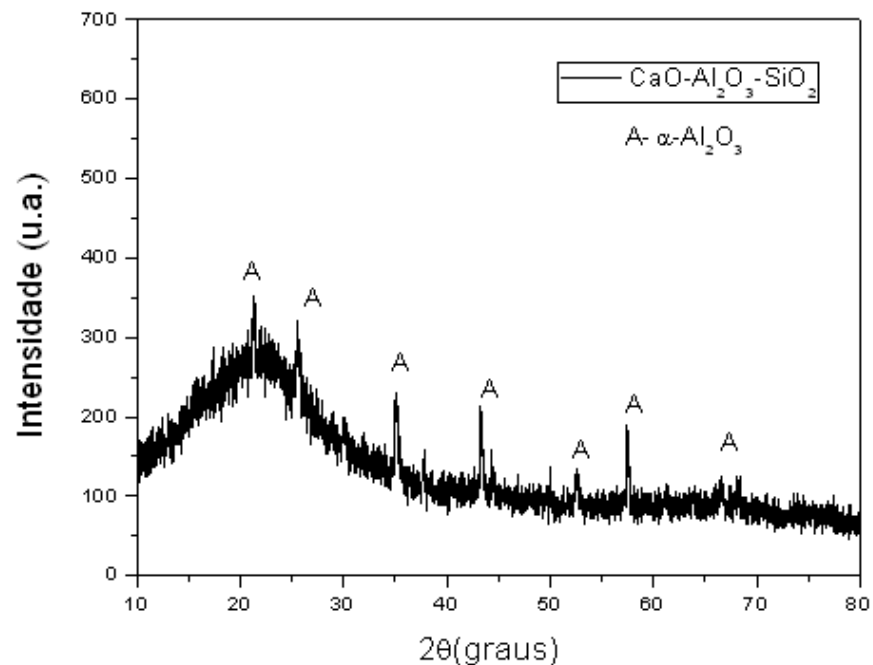


Figura 27 – Difratoograma gerado através da amostra da proteção cerâmica de composição $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

A determinação da densidade das duas proteções cerâmicas caracterizadas não mostraram diferenças significativas (equação 6 e 7). Esse dado foi favorável a

execução das tarefas operacionais na área de trabalho, pois o mesmo esforço executado para manusear a proteção a base de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ seria adotado para manusear a nova proteção de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

$$\rho_{\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2} = M / V_{\text{aparente}}$$

$$\rho_{\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2} = M_{\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2} / V_{\text{aparente}}$$

$$\rho_{\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2} = 0,37 / 0,0013$$

$$\rho_{\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2} = 284,61 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2) = (\rho_{\text{SiO}_2 \text{ teor}}) + (\rho_{\text{CaO teor}}) + (\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ teor}})$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2) = (284,61 \times 51\%) + (284,61 \times 1\%) + (284,61 \times 48\%)$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2) = (145,151) + (2,846) + (136,612)$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2) = 284,61 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{SiO}_2) = 145,151 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{CaO}) = 2,846 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{Al}_2\text{O}_3) = 136,612 \text{ g} / \text{cm}^3$$

Equação 6 – Densidade teórica da proteção cerâmica a base de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

$$\rho_{\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}} = M / V_{\text{aparente}}$$

$$\rho_{\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}} = M_{\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}} / V_{\text{aparente}}$$

$$\rho_{\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}} = 0,44 / 0,00156$$

$$\rho_{\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}} = 282,05 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}) = (\rho_{\text{SiO}_2 \text{ teor}}) + (\rho_{\text{MgO teor}}) + (\rho_{\text{CaO teor}}) + (\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ teor}})$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}) = (282,05 \times 67,2\%) + (282,05 \times 2\%) + (282,05 \times 30) + (282,05 \times 0,8)$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}) = (189,537) + (5,641) + (84,615) + (2,256)$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO}) = 282,05 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{SiO}_2) = 189,537 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{MgO}) = 5,641 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{CaO}) = 84,615 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\rho_{\text{Teórica}}(\text{Al}_2\text{O}_3) = 2,256 \text{ g} / \text{cm}^3$$

Equação 7 – Densidade teórica da proteção cerâmica a base de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

Na realização dos testes de campo com as amostras a base de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ foram obtidos os seguintes resultados mostrados nas tabelas e nas imagens que seguem.

Cada amostra foi utilizada para a realização de um fechamento específico. A amostra 1 foi montada no bico falso na parte frontal da máquina de injeção de massa refratária em altos fornos (figura 25), na mesma figura podemos verificar a frente da máquina de injeção de massa totalmente intacta após a realização da injeção no furo de corrida de ferro gusa.

Essa amostra foi utilizada no furo de gusa 1 do alto forno 2 e a duração da corrida de ferro gusa foi de 110 minutos. A broca utilizada para a abertura da corrida possuía um diâmetro de 55 mm e a quantidade de massa que foi injetada no furo de corrida foi de 1279 kg.

No (anexo 1) seguem os controles dos parâmetros operacionais de injeção de massa refratária (massa de tamponamento) feitos pela tela gráfica do equipamento e as tendências operacionais se mostraram todas estáveis.

A amostra suportou uma temperatura de 1522°C (tabela 3) e não houve qualquer dano a parte frontal denominada (bico falso) da máquina de injeção de massa refratária no furo de corrida de ferro gusa.

Tabela 3 – Teste de campo amostra 1 - proteção de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

FECHAMENTO DO FURO DE GUSA COM PROTEÇÃO SiO_2- AMOSTRA 1						
Data	Corrida	Vazamento	Fechamento	Duração	Furo	Peso
29/12/2011	2691	11h51min	13h41min	110min	1/AF2	1.279 kg
Modo fechamento	Soprou	Queima da frente	Temperatura	Silício	B2	Ferramenta
BOM	Sim	Não	1522°c	0.99	1.16	1/55-1/38



Figura 28 – Teste de campo com amostra 1 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

Conforme mostra a (figura 26) a amostra 2 foi testada no alto forno 1 e a exatidão deste fechamento do furo de corrida está na tela gráfica (anexo 2). Essa corrida teve uma duração maior que a corrida do alto forno 2 em torno de 164 minutos.

Os fechamentos foram realizados no momento em que o volume de ferro gusa e escória líquida diminuíram e iniciou-se a saída de gases pelo furo de corrida. Esse momento é denominado de maneira operacional como “sopro do furo de gusa”, ou seja o momento em que o material líquido (gusa e escória) retidos no cadinho do alto forno termina e somente há gases naquela região.

Operacionalmente é o melhor momento para acontecer a injeção de massa ou seja, o tamponamento. A parte frontal da máquina de injeção de massa (canhão de lama) irá encontrar em seu trajeto até a região de contato com a parede do forno, chamada de boca do furo de gusa, quantidades bem menores de material líquido gusa e escória e quantidades maiores de gases saindo de dentro do alto forno. Este fato irá favorecer a não queima da parte metálica frontal da máquina vulgarmente chamada de “canhão de lama”.

Outro fator ligado ao fato de quando há a saída de gases pelo furo de corrida ser o melhor momento para a realização do fechamento é a constatação através da saída de gases, que a fase líquida e a fase sólida que estavam depositados dentro do alto forno foram retiradas pelo furo de corrida.

Essa amostra foi testada no furo de corrida 2 e submetida a uma temperatura de 1507°C (tabela 4), não houve queima da parte frontal da máquina de injeção de massa refratária .

Tabela 4 – Teste de campo amostra 2 - proteção de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO(29-39)}$.

FECHAMENTO DO FURO DE GUSA COM PROTEÇÃO SiO_2 - AMOSTRA 2						
Data	Corrida	Vazamento	Fechamento	Duração	Furo	Peso
29/12/2011	3561	11h14min	13h58min	164min	2/AF1	1.087kg
Modo fechamento	Soprou	Queima da frente	Temperatura	Silício	B2	Ferramenta
BOM	Sim	Não	1507°C	0.5	1.05	Uma broca 55



Figura 29 – Teste de campo com amostra 2 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

O resultado obtido com a amostra 3 também foi favorável, a mesma foi testada no alto forno 1 no furo de gusa 1, a duração da corrida a qual foi submetida essa amostra foi o mais baixo das 5 amostras testadas 71 minutos de corrida.

Esse tempo de corrida para altos fornos em ritmo de produção em torno de 5 mil toneladas dia deve variar em torno de 100 minutos ou mais. Essa amostra recebeu um ataque térmico extra, pois antes de ser montada na máquina de injeção de massa refratária (canhão de lama) foi vertido ferro gusa líquido sobre a mesma

com a finalidade de verificar sua resistência térmica (figura 27). O histórico dessa operação realizada sofreu acompanhamento e registro através da tela gráfica do (anexo 3), onde o sistema hidráulico da máquina de injeção assim como os movimentos operacionais realizados foram verificados como normais a tarefa executada.

O resultado do teste com a amostra 3 pode ser constatado na (tabela 5) e pode ser verificado também através da ausência de massa refratária embaixo da máquina de injeção de massa. Normalmente quando há a queima da parte frontal durante o fechamento a massa que deveria ser injetada no furo de corrida sai, flui pela região queimada da parte frontal e se deposita em grande quantidade embaixo da mesma emitindo grande quantidade de fumaça e gases, irradiando uma quantidade significativa de calor. Essa massa que não entra no furo de corrida devido a queima da parte frontal deve ser retirada para que o processo produtivo possa ser reestabelecido. O resultado obtido tanto do ataque com gusa vertido como o da própria operação de injeção de massa refratária (massa de tamponamento) foi satisfatório.

Tabela 5 – Teste de campo amostra 3 - proteção de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

FECHAMENTO DO FURO DE GUSA COM PROTEÇÃO SiO_2- AMOSTRA 3						
Data	Corrida	Vazamento	Fechamento	Duração	Furo	Peso
29/12/2011	3562	14h35min	15h46min	71min	1/AF1	1.365kg
Modo fechamento	Soprou	Queima da frente	Temperatura	Silício	B2	Ferramenta
BOM	Sim	Não	1507 °C	0.57	1.09	Uma broca 55



Figura 30 – Teste de campo com amostra 3 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$

Da mesma forma que realizado na amostra 3 foi vertido ferro gusa líquido sobre a amostra 4, por um tempo de 4 minutos e 27 segundos (figura 28) e o ferro gusa não ultrapassou a proteção cerâmica. Após o resfriamento do ferro gusa o mesmo foi retirado já totalmente solidificado e a região de contato com a proteção cerâmica se mostrou totalmente rugosa, porém sem nenhum sinal de combustão ou queima. A tela gráfica (anexo 4) nos mostra que todas as tendências operacionais

estão em conforme com os parâmetros desejados. Essa amostra foi testada no alto forno 2 furo de corrida 2 (tabela 6), o tempo de corrida foi de 145 minutos e não houve queima da parte frontal da máquina de injeção de massa (canhão de lama).

Tabela 6 – Teste de campo amostra 4 - proteção de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

FECHAMENTO DO FURO DE GUSA COM PROTEÇÃO SiO_2 - AMOSTRA 4						
Data	Corrida	Vazamento	Fechamento	Duração	Furo	Peso
29/12/2011	2692	13h54min	16h19min	145	2/AF2	1290
Modo fechamento	Soprou	Queima da frente	Temperatura	Silício	B2	Ferramenta
BOM	Sim	Não	1513	0.57	1.09	1 Broca 55

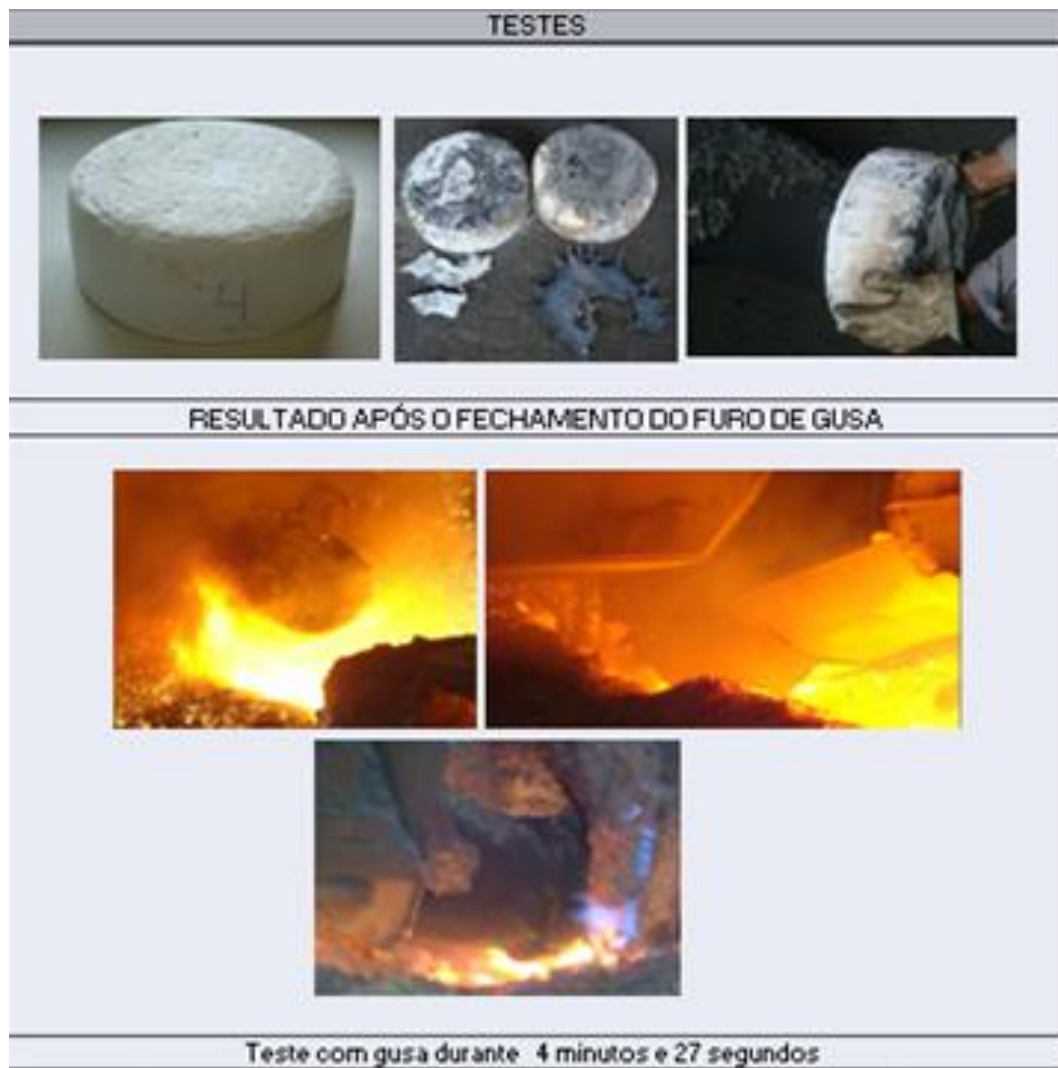


Figura 31 – Teste de campo com amostra 4 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$

Amostra de número 5 foi testada no furo de corrida 1 do alto forno 1 (figura 29). Ela foi submetida a maior temperatura de trabalho das 5 amostras testadas 1528°C (tabela 7) e uma duração de corrida de 175 minutos. O resultado do teste da amostra 5 também foi satisfatório ou seja não houve queima do equipamento. O êxito alcançado na atividade é evidenciado na tela gráfica. (anexo 5).

Tabela 7 – Teste de campo amostra 5 - proteção de $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$.

FECHAMENTO DO FURO DE GUSA COM PROTEÇÃO SiO_2 - AMOSTRA 5						
Data	Corrida	Vazamento	Fechamento	Duração	Furo	Peso
29/12/2011	3563	16h16min	19h11min	175min	1/AF1	1.169Kg
Modo fechamento	Soprou	Queima da frente	Temperatura	Silício	B2	Ferramenta
BOM	Sim	Não	1528°C	0.5	1.07	1 Broca 55



Figura 32 – Teste de campo com amostra 5 proteção cerâmica $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$

6 DISCUSSÃO

Nos testes em campo realizados com amostras da proteção do composto $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$, não houve danos ocasionados por contato com ferro gusa líquido em temperaturas em torno de 1500°C na parte frontal da máquina de injeção de massa nos furos de retirada de ferro gusa e escória líquidos.

O êxito na injeção de massa e a consequente reconstituição do comprimento do furo que retira o ferro gusa e escória líquidos do interior do alto forno manteve a estabilidade do processo produtivo em elevada produtividade. A injeção de massa em quantidade e pressão ideal proporcionou o aumento do comprimento do furo de corrida e quanto maior esse comprimento melhor é a retirada do material líquido, principalmente aqueles que ocupam regiões mais profundas do cadinho onde furos de corrida com baixo comprimento não conseguem escoar.

Esse fato mencionado, ou seja, furos de corrida com comprimentos ideais proporcionam elevada produtividade pela manutenção de um volume útil interno maior para a produção. A (tabela 9) apresenta os resultados de quantidade de injeção de massa em quilos e a temperatura que foi submetida a parte frontal no contato com o ferro gusa, essa temperatura é dada através da medição periódica por termopares imersos no banho metálico fundido.

Tabela 8 – Temperatura de contato e massa injetada no furo de corrida

Amostra	Temperatura de contato da proteção com o ferro líquido em °c	Quantidade de massa injetada no furo de corrida sem queima da parte frontal em Kg
1	1522	127,9
2	1507	108,7
3	1507	136,5
4	1513	129,0
5	1528	116,9

7 CONCLUSÃO

O custo com a aquisição das proteções cerâmicas com status de protótipo obteve uma redução de 15% em cada peça fabricada. É possível verificar que tal fato proporcionou a queda de um gasto anual em proteções cerâmicas que anteriormente era cerca de R\$ 210 mil e passou a ser de R\$ 178 mil, gerando uma economia de cerca de R\$ 32 mil. Já o custo com a aquisição das proteções cerâmicas em fornecimento contínuo terá uma redução de 25% sobre o preço do protótipo, tornando o preço unitário ainda menor. Será obtido uma redução total em custos anuais em torno de R\$ 76 mil reais. A (tabela 10) apresenta os resultados de análise preliminar de viabilidade econômica visando a substituição das proteções de Al_2O_3 pelas ricas em SiO_2 .

Tabela 9 – Diferença de custo entre as proteções.

Proteção antiga	cerâmica	Preço unitário	Quantidade usada dia	Custo diário	Custo mensal	Custo anual
		R\$ 52,23	11	R\$ 574,53	R\$ 17.235,90	R\$ 209.703,45
Proteção nova	cerâmica	Preço unitário (PROTÓTIPO)	Quantidade usada dia	Custo diário	Custo mensal	Custo anual
		R\$ 44,27	11	R\$ 486,97	R\$ 14.609,10	R\$ 177.744,05
Proteção nova	cerâmica	Preço unitário (CONTINUO)	Quantidade usada dia	Custo diário	Custo mensal	Custo anual
		R\$ 33,20	11	R\$ 365,20	R\$ 10.956,00	R\$ 133.298,00

Os resultados operacionais da nova proteção cerâmica permaneceram os mesmos dos praticados anteriormente, porém com economia de 36% no custo em relação ao produto em uso nos equipamentos se adquiridos de forma contínua.

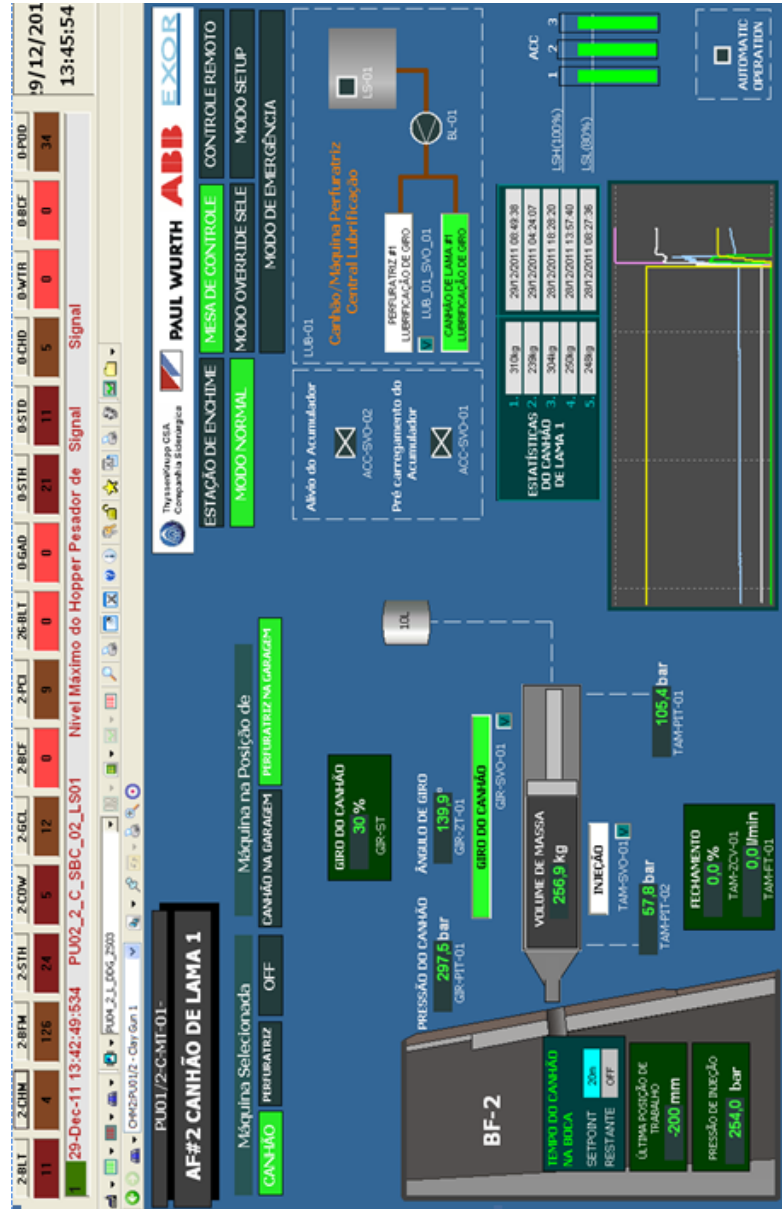
Em cada forno em operação temos aproximadamente 11 corridas dia, o que torna a economia considerável considerando retenção de custo. Existe também o ganho indireto relacionado à redução da exposição ao agente de risco (fibras) que podem ocasionar danos ao aparelho respiratório, as proteções cerâmicas a base de $SiO_2(62-68)-MgO+CaO(29-39)$ possuem menos fibras o que a torna menos prejudicial do que o modelo anteriormente usado.

8 TRABALHOS FUTUROS

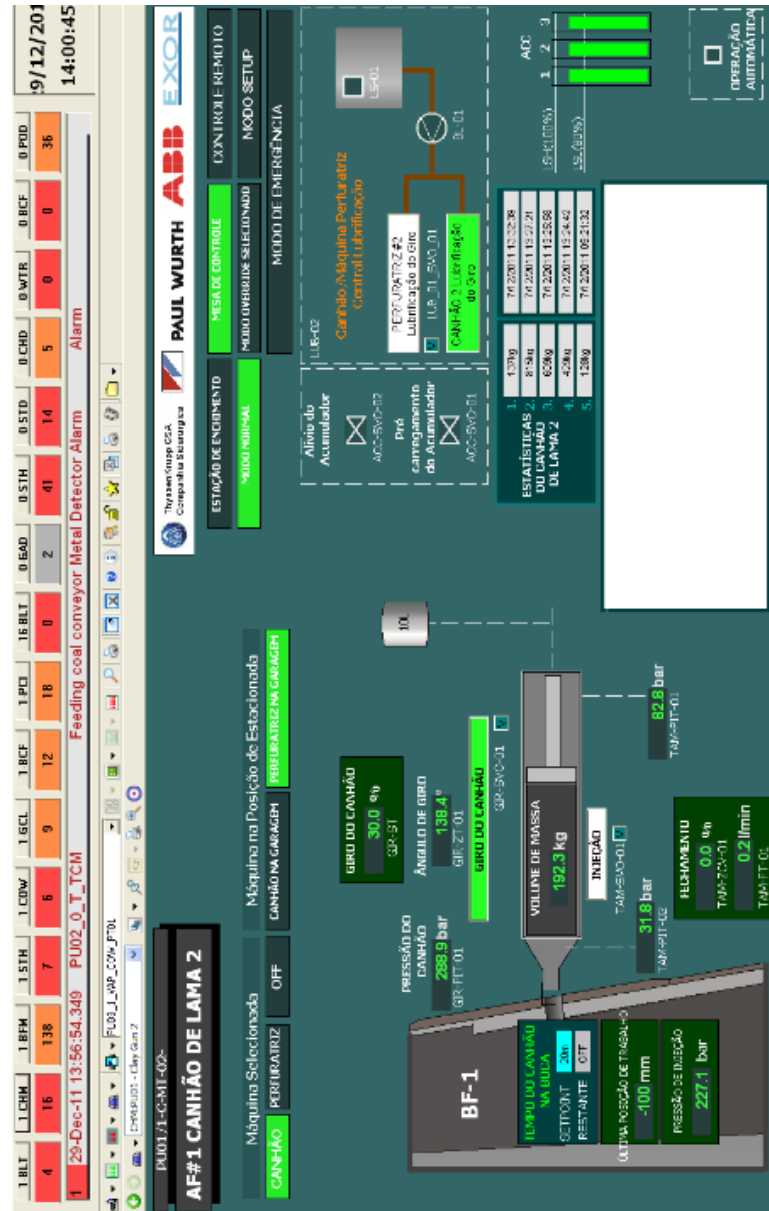
Para continuidade deste trabalho sugerimos a realização de estudos e substituição de outros compostos de forma a promover a redução do custo do ferro gusa e conseqüentemente do aço.

Há um grande número de materiais refratários (cerâmicas avançadas) que podem ser estudadas, analisados e substituídas por outros de menor valor agregado mantendo o mesmo desempenho operacional.

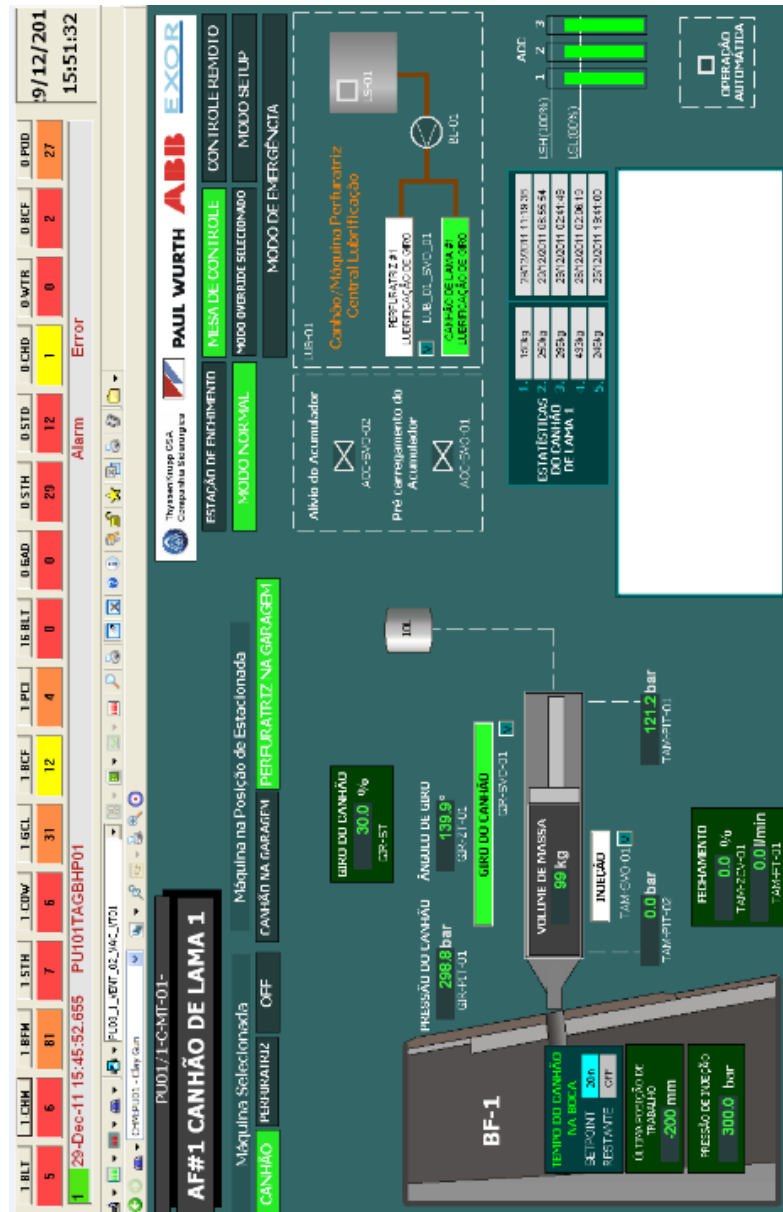
Anexo 1 - Teste de campo amostra 1 proteção cerâmica SiO₂ (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica



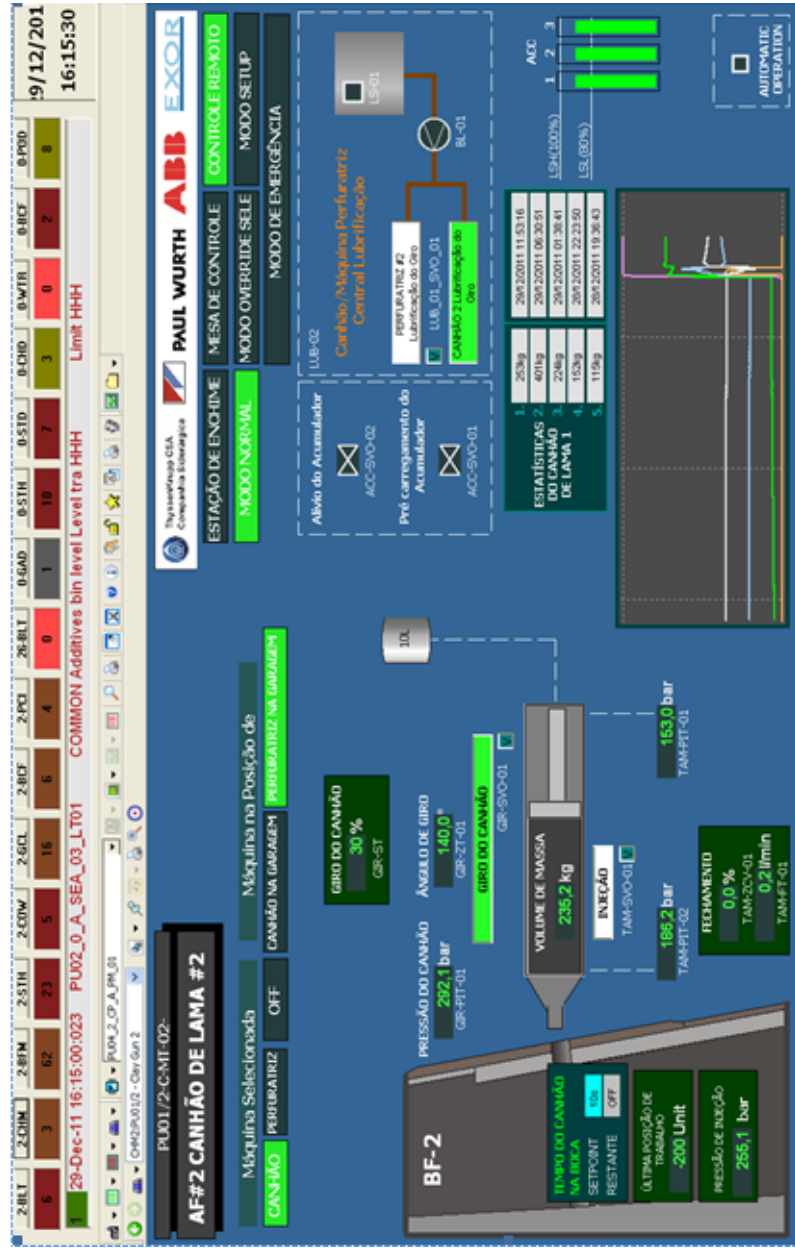
Anexo 2 - Teste de campo amostra 2 proteção cerâmica SiO₂ (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica



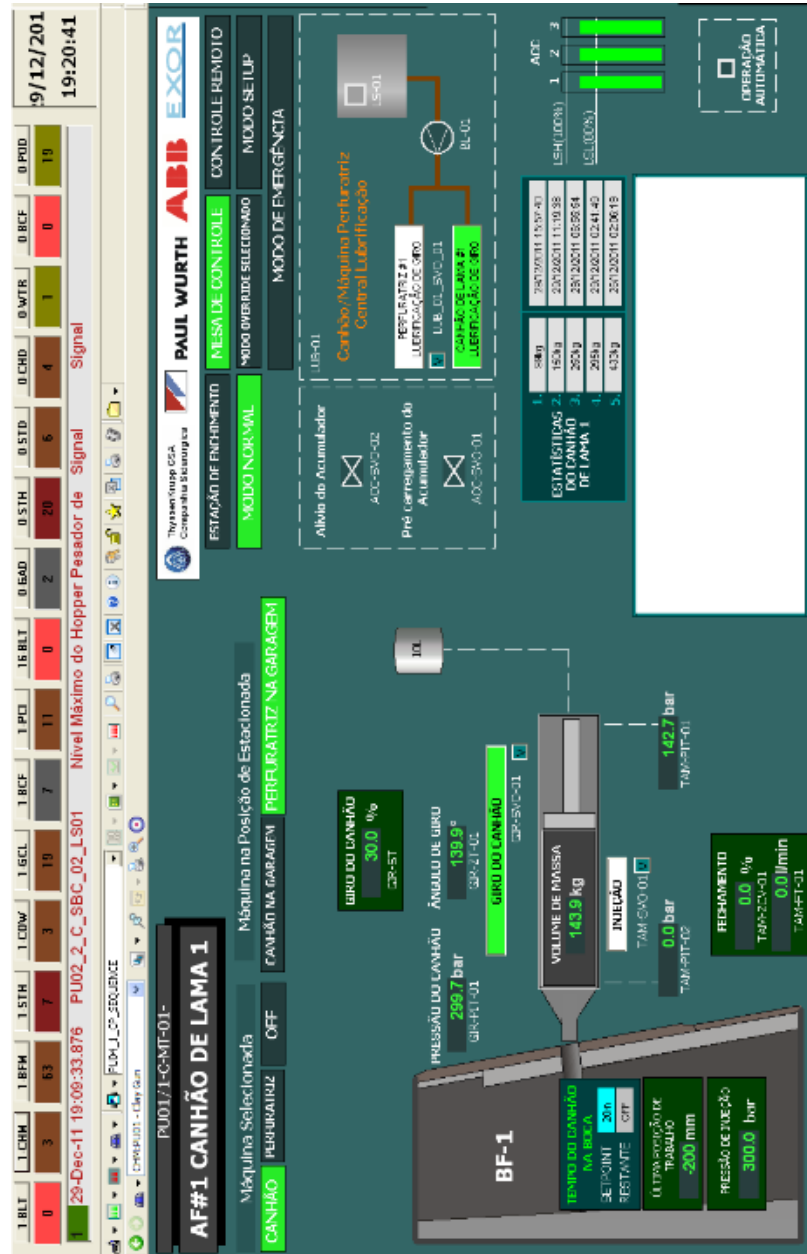
Anexo 3 - Teste de campo amostra 3 proteção cerâmica SiO₂ (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica



Anexo 4 - Teste de campo amostra 4 proteção cerâmica SiO₂ (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica



Anexo 5 - Teste de campo amostra 5 proteção cerâmica SiO₂ (62-68)-MgO+CaO(29-39) / Tela Gráfica



9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.wto.org/>, **Site da World Trade Organization** – Acesso em 10 de outubro de 2013.
- [2] Luiz Antônio de Araújo. **Manual de Siderurgia – Volume 1 – Produção**. Editora Arte & Ciência. 2009. 470 páginas.
- [3] **Livro Materiais de engenharia microestrutura e propriedades**; Por Angelo Fernando Padilha; PAG 352; EDITORA hemus; **1997**.
- [4] WILLIAM D. CALLISTER, Jr.; **Materials Science and Engineering**, John Wiley & Sons, Inc., Third Edition, New York, 1994.
- [5] JRR SILVA; **Caracterização Físico Química de Massas Cerâmicas**; UFPR; Dissertação de Mestrado; 2005; 67p.
- [6] **Desenvolvimento de Novos Materiais Cerâmicos a Partir de Resíduos da Mineração de Serpentinó: Obtenção e Caracterização**; UNVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ PETULA PRESOTTO ; CURITIBA 2012; Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.
- [7] Van Vlack, Lawrence Hall/Ferrao, Luiz Paulo Camargo. **Princípios de ciência dos materiais**. Edgard blucher, 1998, São Paulo. (Cerâmicas e Compósitos).
- [8] BORBA, C. D. G.; NETO, J. B. R.; OLIVEIRA, A. P. N.; ECHUDE, L. C. F.; ALARCÓN, O. E. **Estudo de matérias-primas fundentes**. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 34-39, 1996. BUSTAMANTE, G. M.; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 31-36, 2000.
- [9] MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JÚNIOR, M.; TANNO, L. C.; CUCHIERATO, G. **As matérias-primas plásticas para a cerâmica tradicional: argilas e caulins**. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 33-46, 2004.
- [10] MOTTA, J. F. M.; CABRAL JUNIOR, M.; TANNOM L. C.; ZANARDO, A.; **As matérias-primas cerâmicas**. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 33-40, 2002.
- [11] CORREIA, S. L. **Desenvolvimento de Metodologia de Formulação de Massas Cerâmicas Triaxiais Utilizando Delineamento de Misturas e Otimização**. 140 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

- [12] MELCHIADES, F. G.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. **A curva de gresificação. Parte II.** *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 2, n. 1-2, p. 23-26, 1997.
- [13] VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; DUAILIBI FILHO, J. **Formulação de massa de revestimento cerâmico com argilas plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP).** *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 6, n. 6, p. 43-49, 2001.
- [14] MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. **As matérias-primas cerâmicas.** Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.
- [15] VICENZI, J. **Efeito da adição de chamota em uma massa cerâmica de argila vermelha.** 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- [16] <http://www.cardall.com.br/produtos>, **Site da Empresa Cardall**, acesso em 5 de abril de 2014.
- [17] MANUEL J. R., JOSÉ M. VENTURA E JOÃO A. LABRINCHA. **A Atomização como Processo de Obtenção de Pós para a Indústria Cerâmica.** 7p. Artigo científico, *Revista Cerâmica Industrial*, 2001.
- [18] FREITAS, C. S. R.; PEREIRA, I. A. F. S.; PEREIRA, M. L. G.; SIMÕES, T. C. R.; FERREIRA, A. A. L. **Influência de diferentes processos de conformação nas características finais de produtos cerâmicos.** *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 15-18, 2009.
- [19] REED, J. S. **Principles of ceramics processing.** New York: John Wiley & Sons, 1995. 93
- [20] VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. **Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot.** *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 42-46, 2003.
- [21] PAULETTI, M. C. **Modelo para introdução de nova tecnologia em agrupamentos de nova em agrupamentos de micro e pequenas empresas:** estudo de caso das indústrias de cerâmica vermelha no Vale do Rio Tijucas. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [22] SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha.** 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

- [23] LOBATO, E. **Refratários. Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. Brasília, 2009. 22 p. Relatório Técnico 71: versão internet. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 20 de agosto de 2011.
- [24] Z. S. Macedo, A. C. Hernandes, **Sinterização ultra-rápida de materiais cerâmicos usando radiação laser (*Ultra-fast laser sintering of ceramic materials*)**, Revista Cerâmica, Vol. 46, Novembro de 2000.
- [25] CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials: Science and engineering**. New York: Springer, 2007. 716 p.
- [26] GODINHO, K. O. **Incorporação de resíduos de vidro em cerâmica vermelha**. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2004.
- [27] WACHTMAN, J. B.; CANNON, W. R.; MATTHEWSON, M. J. **Mechanical properties of ceramics**. 2nd ed. New Jersey: Hoboken, 2008.
- [28] GLADSTONE MOTTA BUSTAMANTE E JOSÉ CARLOS BRESSIANI, **A indústria cerâmica brasileira**, Cerâmica Industrial, São Paulo, Junho 2000, 36 p.
- [29] DAL BÓ, M.; BARBETTA, P. A.; HOTZA, D. **Utilização de resíduos da indústria de revestimentos cerâmicos na fabricação de refratários triaxiais**. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 12, n. 1-2, p. 42-46, 2007.
- [30] DUTRA, R. P. S.; VARELA, M. L. V.; NASCIMENTO, R. M.; GOMES, U. U.; PASKOCIMAS, C. A.; MELO, P. T. **Avaliação da potencialidade de argilas do Rio Grande do Norte, Brasil**. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 42-46, 2006.
- [31] SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 408 p.
- [32] MÔNICA CASTOLDI BORLINI - (Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação do Campus Avançado de Cachoeiro de Itapemirim – **Cetem/es Estudo da Condutibilidade Térmica de Resíduo de Manta Cerâmica e da Viabilidade Técnica de Sua Utilização na Fabricação de Argamassa**, 2008, 14 páginas.
- [33] MORGAN CERAMICS - MORGANITE BRASIL LTDA. **Fibras de baixa bio-persistência sem risco a saúde**. Itaguaí - RJ. Relatório Técnico. 89 páginas.
- [34] <http://www.acobrasil.org.br>, Site do Instituto Aço Brasil antigo Instituto Brasileiro de Siderurgia, acesso em 5 de abril de 2014.

- [35] BEATRIZ FAUSTA GANDRA; **Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno**; Universidade Federal de Minas Gerais; (UFMG); 2006; 98 Pag.
- [36] Luiz Fernando Andrade de Castro, Roberto Parreira Tavares. **Tecnologia de fabricação de ferro gusa em altos fornos**. Belo Horizonte - MG. Editora da Escola de Engenharia – UFMG. 1998. 774 páginas.
- [37] Aloísio Simões Ribeiro. **Análise sistêmica das massas de tamponamento para altos fornos**. São Carlos - SP. Dissertação de Mestrado – UFSCar. 2010. 222 páginas.
- [38] THYSSEN KRUPP-CSA, **Desenho Técnico**, Blast Furnace, Cast House, Mud Guns, Main Nozzle, Ref. CHP_01_Y82_MDG_F56_0001_001, revision B.
- [39] Tatiana de Bona Rocha; **Estudo das Propriedades de Cerâmicas Refratárias Formuladas com Resíduos Industriais**; Universidade Federal de Santa Catarina; Curso de Engenharia de Materiais e Vidro; 2005.
- [40] JCPDS - **Joint Committee on Powder Diffraction Standard. Inorganic Materials**. Pensilvania: International Centre for Diffraction Data Swarthmore. 1979.
- [41] THYSSEN KRUPP-CSA, **Nimbus**, Medida Provisória, Área Alto Forno, DOC 2153.