



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS



ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE MASSAS REFRAATÁRIAS UTILIZADAS EM REPAROS  
DE PANEAS DE ACIARIA ELÉTRICA**

Autor:  
Bruno Wartchow Laidens  
00191717

Professor Orientador  
Dr. Saulo Roca Bragança

Porto Alegre, 2016



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Gilmar Lopes Laidens e Andrea Jaqueline Wartchow Laidens por terem me dado todas as condições possíveis para que eu pudesse realizar o sonho de estar concluindo minha graduação.

A minha companheira Thays Cavalheiro Viana, que dividiu todos os momentos comigo ao longo da minha graduação.

Ao professor Dr. Saulo Roca Bragança pela orientação e dedicação ao longo de toda a minha trajetória no desenvolvimento deste trabalho. Suas aulas despertaram meu interesse e tornaram possível a descoberta da oportunidade que deu origem a este estudo.

A engenheira Bruna Berti de Sousa, pela parceria, dedicação e pela ajuda com os testes realizados no LACER.

Ao engenheiro Leonardo Magalhães dos Reis por ter acreditado no projeto, quando ele era apenas um conceito e ter me ajudado a torná-lo possível.

Aos engenheiros Jakson Mattiello, Alexandre Liborio John, Gustavo Frassini Pelisser, Rogério de Oliveira Nunes, Luana Silveira de Oliveira e Jose Antonio Carbonell por todo suporte e ajuda que recebi ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Samuel Maurer, Alexandro Oliveira e Rafael Santiago pelo companheirismo e por toda a experiência de refratários que compartilharam comigo.

Aos colaboradores da Gerdau Riograndense que participaram deste projeto, o envolvimento e interesse no estudo foram indispensáveis para a realização dos testes. Um agradecimento em especial aos colaboradores Rodinei Leal Pietrowski, Sidnei Moreira Maciel Junior, Eduardo Lopes de Oliveira e Fábio Fiorelo Veiga Fogliatto.

Aos meus amigos de graduação e professores pelo companheirismo e ensinamentos, que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal. Agradecimento especial para Marcelo Serra Guarise e Taianne Trichês Lucchesi pela ajuda com os testes na planta e laboratório, e Giordano Bernardes por toda ajuda ao longo da graduação.

Às instituições Gerdau e UFRGS, por incentivarem projetos de inovação e melhoria.



## RESUMO

Na indústria do aço, é de extrema importância o monitoramento do desempenho dos materiais refratários utilizados no processo. Esses materiais apresentam influência direta na qualidade do aço, possuem um impacto relativamente alto no custo do aço produzido e determinam a segurança operacional e, principalmente, a segurança dos operadores que trabalham diretamente no processo.

As massas refratárias de reparo à quente de sede de plugue em panela de aço são utilizadas a fim de se aumentar a vida útil dessa peça, as quais necessitam longo tempo para a troca. O reparo é realizado por meio da aplicação das massas diretamente sobre as sedes durante a manutenção da panela, em uma temperatura de  $\sim 900^{\circ}\text{C}$ . Isto propicia um ganho considerável na campanha da panela, com a redução do tempo de parada, evitando-se também choques térmicos mais severos. O objetivo do presente trabalho foi, portanto, a caracterização técnica das massas refratárias, gerando um maior conhecimento sobre esses materiais, a fim de se subsidiar a seleção da massa mais adequada para utilização na panela de aço na Usina Riograndense. Uma massa magnesiana (concreto de fluência livre), duas aluminosas (concretos convencionais) e uma magnesiana (concreto convencional) foram analisadas por meio de diversas técnicas, como análise de imagens (lupa eletrônica e MEV), distribuição granulométrica, porosidade, composição química, análise mineralógica, resistência à compressão e teste de tração de aderência entre o substrato (sede) e a massa. Foram consideradas a qualidade técnica da massa, facilidade de aplicação, compatibilidade com o revestimento refratário e vida útil do reparo.

Os resultados mostraram que a massa de reparo magnesiana com resina de fluência livre com cura à quente apresentou os melhores resultados de reparo de sedes. Além de apresentar uma significativa resistência à compressão, ela facilita a instalação, devido a sua melhor fluidez, propiciando uma maior penetração na porosidade e aderência mais efetiva no substrato. O uso dessa massa representa uma economia significativa no processo.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Etapas da produção do aço em uma aciaria semi integrada com forno elétrico a arco. ....	16
<b>Figura 2:</b> Esquema de um forno elétrico a arco. ....	18
<b>Figura 3:</b> Etapas do processo de fusão e refino primário do FEA. ....	19
<b>Figura 4:</b> Esquema de funcionamento de um forno panela. ....	20
<b>Figura 5:</b> Componentes geralmente utilizados em um distribuidor de LC ....	21
<b>Figura 6:</b> Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo. ....	22
<b>Figura 7:</b> Tarugos produzidos no final do lingotamento contínuo.....	22
<b>Figura 8:</b> Panela com aço em estado líquido, logo após o vazamento do FEA. ....	24
<b>Figura 9:</b> Esquema em corte de uma panela de aço de aciaria elétrica. ....	26
<b>Figura 10:</b> Ciclo Operacional de Panela em uma aciaria elétrica. ....	26
<b>Figura 11:</b> Momento em que ocorre a limpeza do sistema de rinsagem da panela após a mesma ter realizado uma corrida. ....	27
<b>Figura 12:</b> Fluxo de aço com injeção de gás pelo fundo .....	28
<b>Figura 13:</b> Esquema simplificado de um plugue poroso. ....	29
<b>Figura 14:</b> Formato usual de uma sede de plugue.....	30
<b>Figura 15:</b> Esquema de aplicação do revestimento de reparo na sede de plugue. ....	31
<b>Figura 16:</b> Panela posicionada no trole para inspeção e substituição de equipamentos refratários. (a) Panela com o plugue gasto já retirado. (b) panela com plugue novo. (c) plugue novo já com a massa de reparo. ....	32
<b>Figura 17:</b> Misturador de massa e reparo.....	33
<b>Figura 18:</b> Desenho da plataforma de aplicação do reparo.. ....	34
<b>Figura 19:</b> Abertura usada para jogar massa de reparo sobre a sede de plugue com a panela posicionada abaixo da plataforma de reparo.....	34
<b>Figura 20:</b> Massa de fluência livre com composição previamente acertada pelo fornecedor sendo aplicada. ....	35
<b>Figura 21:</b> Equipamento utilizado no teste de determinação de aderência à tração. ....	38
<b>Figura 22:</b> Análise visual das massas refratárias de reparo de sede: AL-1 (Empresa A), AL-2 (EMPRESA B).....	40
<b>Figura 23:</b> Imagem da massa de reparo de sede AL-2 (EMPRESA B) em Lupa, em detalhe a presença de fibras. ....	40

<b>Figura 24:</b> Análise visual das massas refratárias de reparo de sede MAG-1 e MAG-2.....	41
<b>Figura 26:</b> Análise das fases componentes da massa AL-1 por DRX. ....	43
<b>Figura 25:</b> Análise das fases componentes da massa AL-2 por DRX. ....	44
<b>Figura 27:</b> Análise das fases componentes da massa MAG-1 por DRX.....	44
<b>Figura 28:</b> Análise das fases componentes da massa MAG-2 por DRX.....	45
<b>Figura 29:</b> Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa AL-2 sinterizada a 1400°C. ....	46
<b>Figura 30:</b> Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa AL-1 sinterizada a 1400°C. ....	46
<b>Figura 31:</b> Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa MAG-1 sinterizada a 1400°C. ....	47
<b>Figura 32:</b> Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa MAG-2 sinterizada a 1400°C. ....	47
<b>Figura 33:</b> Distribuição e diagrama de análise granulométrica da AL-1 (Empresa A).....	49
<b>Figura 34:</b> Distribuição e diagrama de análise granulométrica da AL-2 (EMPRESA B).....	50
<b>Figura 35:</b> Distribuição e diagrama de análise granulométrica da MAG-1 (Empresa A).....	51
<b>Figura 36:</b> Corpos de prova para ensaio de compressão. ....	53
<b>Figura 37:</b> Diferentes massas de reparo sobre a sede. (a)AL-2 (EMPRESA B) a temperatura ambiente, (b) AL-1 (Empresa A) a temperatura ambiente, (c) AL-1 (Empresa A) a 1400°C, (d) Mag-2 (Empresa A) a 120°C já preparado para o ensaio de adesividade. ....	56
<b>Figura 38:</b> Massa Mag-2 fraturada após ensaio de adesividade. ....	57
<b>Figura 39:</b> Histograma da média da vida dos plugues durante a realização do teste.....	59
<b>Figura 40:</b> Histograma do desgaste médio da sede por reparo realizado.....	60
<b>Figura 41:</b> Histograma da quantidade média de massa utilizada por reparo..	61

## **LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação 1: Fórmula de Sauter.....	36
Equação 1: Índice de Hausner.....	37

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Relação de massas analisadas. ....	36
<b>Tabela 2:</b> Composição química das massas AL-1 (Empresa A), AL-2 (EMPRESA B), MAG-1 (Empresa A) e MAG-2 (Empresa A).....	42
<b>Tabela 3:</b> Médias dos resultados de resistência à compressão. AL-2, AL-1 e MAG-1.....	53
<b>Tabela 4:</b> Resultados obtidos para absorção de água, porosidade aparente e densidade das diferentes massas AL-1, AL-2, Mag-1, Mag-2 preparadas a temperatura ambiente e após queima a 1400°C. ....	54
<b>Tabela 5:</b> O índice de Hausner obtido para as massas de reparo materiais de reparo AL-1 (Empresa A), AL-2 (EMPRESA B), MAG-1 (Empresa A). ....	55
<b>Tabela 6:</b> Resultado do teste de resistência a tração da aderência (MPa).....	57
<b>Tabela 7:</b> Resultados obtidos com a massa AL-1.....	58
<b>Tabela 8:</b> Resultados obtidos com a massa Mag-2.....	59
<b>Tabela 9:</b> Comparação do desempenho entre as massas Al A e Mag B. ....	61
<b>Tabela 10:</b> Valores simulados de consumo para uma panela com 280 corridas.	62



# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES .....</b>	<b>7</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1 OPERAÇÕES DE ACIARIA A ARCO ELÉTRICO.....	16
3.1.1 PÁTIO DE SUCATAS .....	17
3.1.2 REFINO PRIMÁRIO .....	18
3.1.3 REFINO SECUNDÁRIO .....	20
3.1.4 LINGOTAMENTO CONTÍNUO .....	21
3.2 REFRATÁRIOS.....	23
3.2.1 PANEAS DE AÇO.....	23
3.2.2 SISTEMA DE RINSAGEM .....	28
3.2.3 PLUGUE DE RINSAGEM.....	29
3.2.4 SEDE DE PLUGUE .....	30
3.2.5 REPARO EM SEDE DE PLUGUE .....	31
<b>4. MATERIAIS E METODOS .....</b>	<b>36</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>40</b>
5.1 ANÁLISE VISUAL .....	40
5.2 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA SEMI-QUANTITATIVA.....	42
5.3 ANÁLISE MINERALÓGICA.....	43
5.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS MASSAS SINTERIZADAS A 1400°C .....	45
5.5 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	48
5.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	52

5.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA, POROSIDADE E DENSIDADE .....	53
5.8 ÍNDICE DE HAUSNER .....	55
5.9 ADESIVIDADE.....	55
5.10 TESTES NA INDÚSTRIA.....	58
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
<b>7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>65</b>
<b>8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica por estar inserida em um contexto de alta competitividade e desenvolvimento tecnológico sempre almeja a redução de custo e aumento de produtividade. Devido à instabilidade no cenário econômico atual presente em diversos setores produtivos do país, torna-se mais acirrada a disputa pelo mercado (Instituto Aço Brasil – 2016). Cabendo às empresas buscarem alternativas no desenvolvimento e aperfeiçoamento no processo produtivo

No caso específico da produção de aço à construção civil, indústria responsável por mais de 50% da produção de aço no mundo (World Steel Association, 2012), observa-se sua forte dependência com a taxa de crescimento do país (Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2016), cujo mercado se encontra em um ambiente de instabilidade e de difícil previsão quanto à demanda de produto. Esses fatos instigam a busca por alternativas de processo que aprimorem a eficiência de produção, reduzindo o custo, sem comprometer a segurança. Para isso, é necessário o aprimoramento de práticas operacionais assim como a correta seleção de materiais.

O material refratário consumido na geração do aço em uma aciaria elétrica representa uma relevante parcela no custo de produção. Estimasse que o consumo específico de refratários saiu de um patamar de 412 mil toneladas em 1998 para aproximadamente 500 mil toneladas em 2008. Sendo, a redução do seu consumo específico tendência nacional e internacional, onde em 1985 necessitava-se 20kg de refratário para produzir 1 tonelada de aço, hoje em dia, pode-se produzir a mesma quantidade de aço com 10kg de refratário, uma redução de 50% (Ministério de Minas e Energia – MME, 2009).

Por tudo isso, o refratário empregado deve ser capaz de desempenhar sua função, apresentando a maior vida útil possível. No entanto, prolongar a vida de um material que sofre, em geral, desgaste progressivo, pelo maior tempo possível, é também otimizar seu desempenho técnico, sem comprometer a segurança dos operadores do processo (CASSÉTE, 2000).

O foco do trabalho aborda a caracterização e comparação de quatro revestimentos utilizados no reparo e manutenção da sede de plugue, equipamento este, que é fundamental para garantir a correta homogeneização

do aço, cujo desgaste e falha operacional perfazem uma das principais causas de saída prematura de uma panela de aço do processo siderúrgico (MAGNESITA, 2016).

A motivação para esse estudo foi a inconstância de resultados de desempenho dos revestimentos utilizados, encontrando-se grande variação de dados, desconhecendo-se, muitas, vezes detalhes de processo. Em geral, a vida útil variava de 3 a 30 corridas. Assim, é essencial o entendimento dos fenômenos presentes que são responsáveis pela qualidade do reparo, cuja elucidação se buscou através da caracterização técnica e microestrutural de diferentes massas refratárias. Deste modo, procurar-se-á avaliar as propriedades das massas e o desenvolvimento de metodologia, a fim de selecionar a melhor massa para reparo de sede. Esses dados foram analisados com os testes de desempenho das massas na indústria, por meio do número de corridas e desgaste final de cada material.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Caracterização técnica e microestrutural de diferentes massas refratárias com o objetivo de selecionar o material mais indicado para ser utilizado no reparo de sede de plugue de panelas siderúrgicas.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

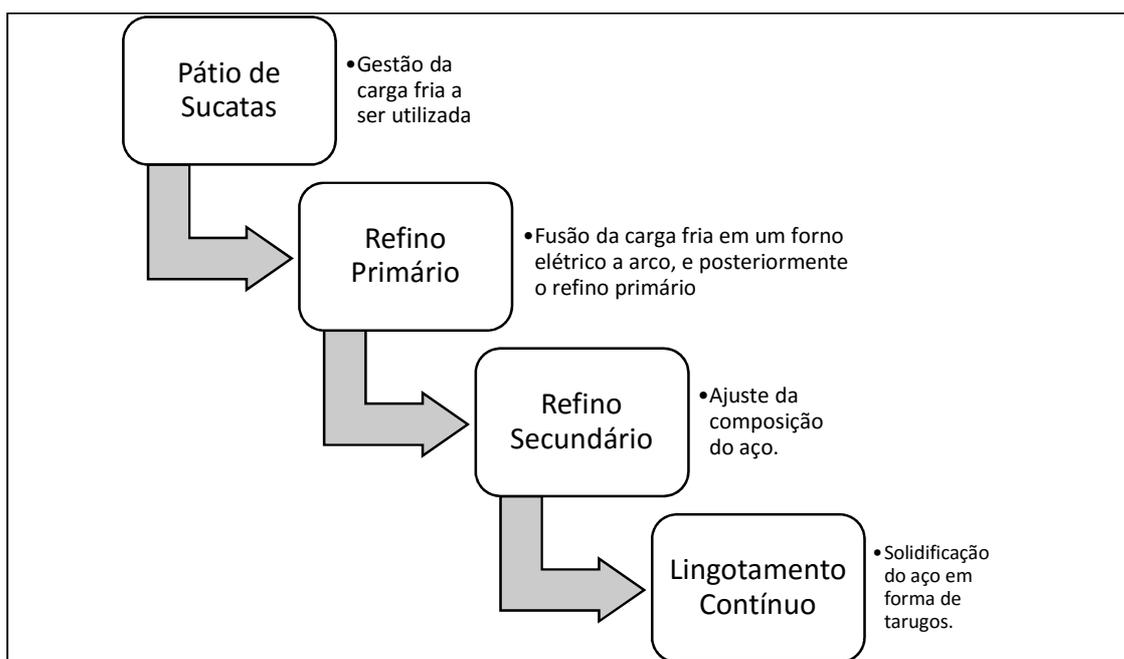
- Verificar as propriedades técnicas das massas com o desempenho das mesmas em serviço.
- Analisar as massas refratárias com uso de lupa eletrônica (software de análise de imagens) e microscopia eletrônica de varredura.
- Avaliar a resistência mecânica, a distribuição granulométrica das massas, absorção de água, porosidade aparente e densidade das massas não-sinterizadas e sinterizadas.
- Determinar a composição química por técnica de fluorescência de raios X (FRX) semi-quantitativa e Análise mineralógica por Difração de raios X (DRX)
- Avaliar o desempenho dos materiais pelo número de corridas e desgaste em serviço.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma aciaria elétrica é composta de vários setores distintos responsáveis por etapas específicas da produção do aço. Este trabalho foi desenvolvido em uma usina semi integrada que utiliza forno elétrico a arco.

#### 3.1 OPERAÇÕES DE ACIARIA A ARCO ELÉTRICO

Pode-se observar o fluxo de operações para uma aciaria semi integrada na Figura 1.



**Figura 1:** Etapas da produção do aço em uma aciaria semi integrada com forno elétrico a arco.

### **3.1.1 PÁTIO DE SUCATAS**

O pátio de sucatas é a célula responsável pelo recebimento, armazenamento, beneficiamento e movimentação da sucata metálica empregada na produção de aço.

O recebimento de sucata ocorre de 3 maneiras: ferro gusa trazido principalmente por via férrea, a sucata que chega em caminhões e internamente através do retorno interno e a sucata recuperada. (SANTOS, 2013)

O ferro gusa que chega ao Pátio é oriundo do processo de redução do minério de ferro em alto forno. Tem papel importante na carga como fonte de carbono e deve ter nível controlado de elementos residuais. Seu emprego na carga fria pode variar de 0 a 15% dependendo de como esteja o mercado de sucatas. Na fabricação de aços longos de baixo, médio e alto carbono existem três grupos de classificação de sucata: sucatas industriais, obsolescência e carburantes. (SANTOS, 2013)

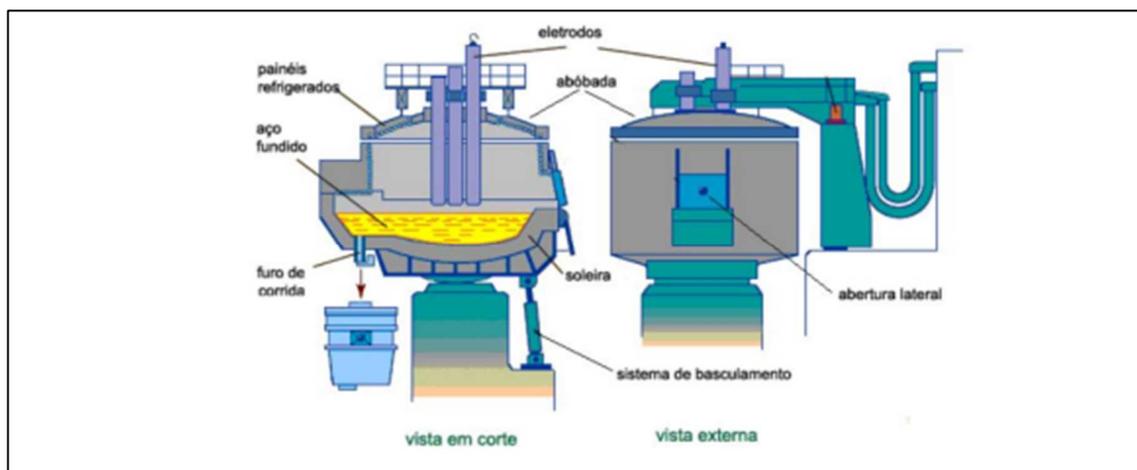
As chamadas sucatas industriais que são sucatas geradas nas indústrias, possuem um nível de impureza e de oxidação menor que a de obsolescência.

As sucatas carburantes são os ferros fundidos gerados em fundições. Sucatas geradas internamente abrangem o retorno interno que é o sucateamento de material metálico gerado no Lingotamento Contínuo, nas Laminações, Trefilas, Fábrica de Pregos e logística, e a sucata recuperada na planta de beneficiamento de escória. (SANTOS, 2013)

Após a etapa de processamento da sucata a mesma é carregada no cestão que irá abastecer o Forno Elétrico a Arco.

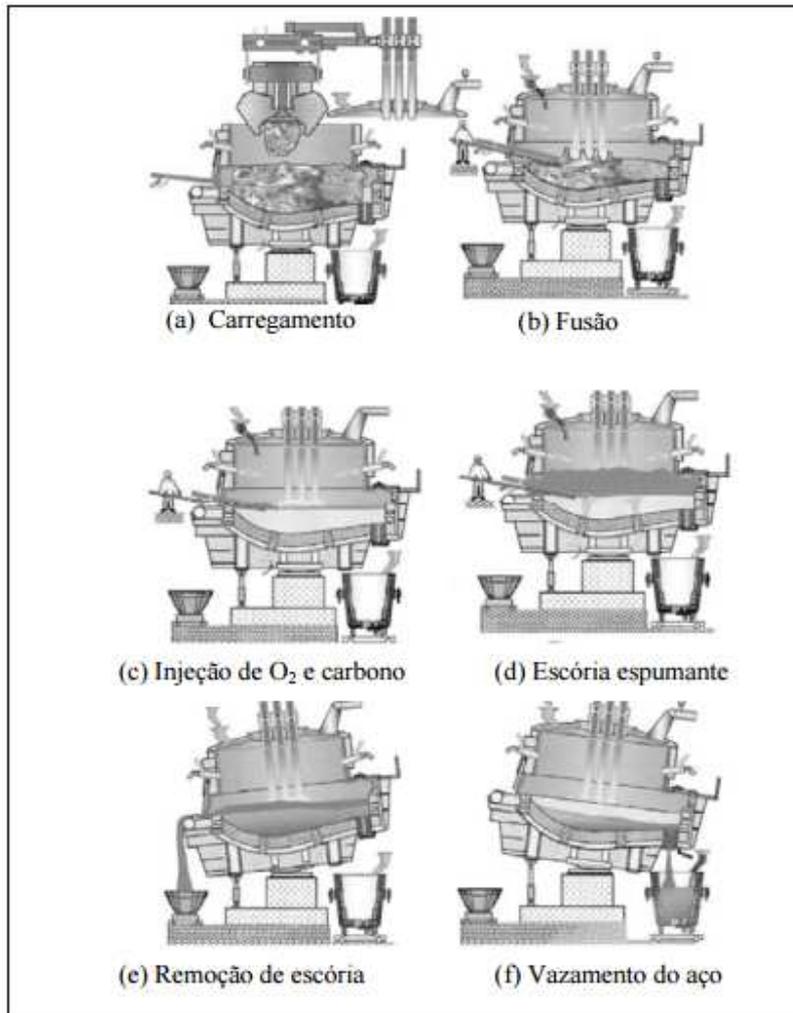
### 3.1.2 REFINO PRIMÁRIO

O refino primário inicia-se no forno elétrico a arco (FEA) com a fusão da matéria-prima, que vem do PPC (Pátio de preparação de cestão) através do cestão por meio da energia liberada pelo arco elétrico estabelecido entre os eletrodos e a carga metálica, e também pela energia química gerada pela injeção de oxigênio, fundindo-a e mantendo o banho de metal líquido em temperaturas próximas a 1600°C (SCHEID, 2010). As principais operações desta etapa são o carregamento, de sucata, ferro-gusa sólido e fundentes no forno, a fusão se dá através da energia do arco elétrico, da energia química, que é incrementada com a adição de oxigênio e a oxidação do banho para a descarburização e desfosforação. O forno elétrico é composto por uma carcaça metálica revestida por material refratário (soleira) e painéis refrigerados conforme pode-se verificar na Figura 2.



**Figura 2:** Esquema de um forno elétrico a arco. Fonte:(Enciclopédia Britânica, 2010).

Esta carcaça é coberta por uma abóbada, por onde descem os eletrodos constituídos de grafita que, por conduzirem eletricidade, são os responsáveis pela formação do arco elétrico, ou seja, da transferência de energia para a sucata, tornando possível a fusão da carga fria, o fluxo de trabalho do FEA pode ser descrito na Figura 3.



**Figura 3:** Etapas do processo de fusão e refino primário do FEA.  
(MAXWELL, 2016).

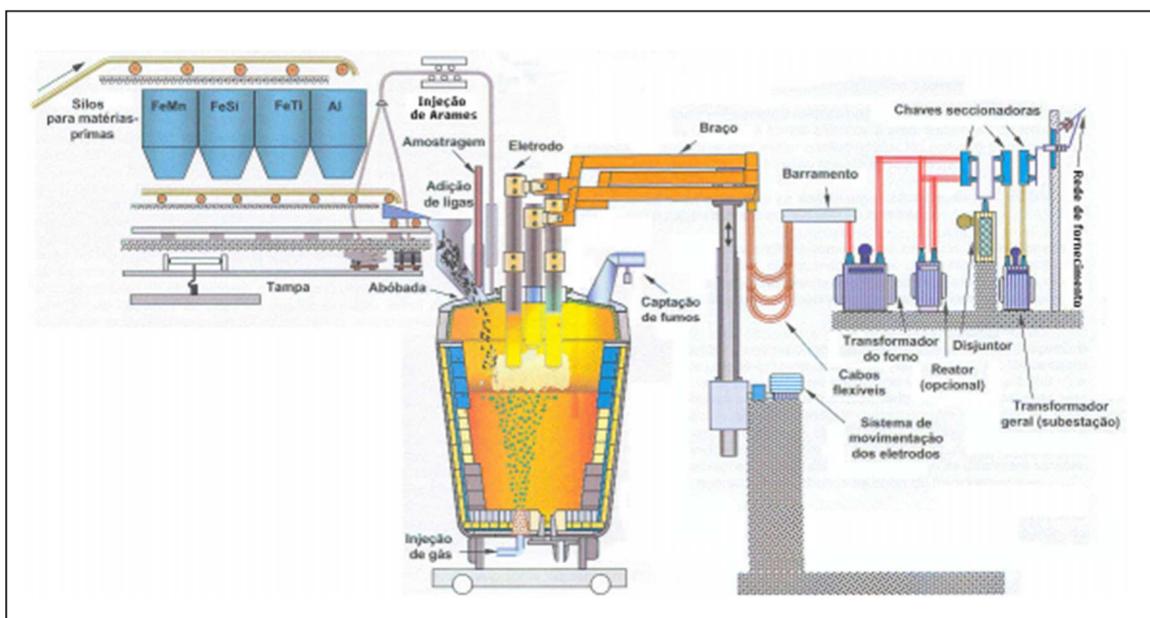
Por fim, a escória é removida e o aço é vazado para a panela onde será feito o refino secundário.

### 3.1.3 REFINO SECUNDÁRIO

O refino secundário é a etapa na qual a composição química e a temperatura do aço são ajustadas.

Nesta etapa são realizadas operações de injeção de gases inertes para homogeneização do banho, ajustes térmicos e adições de ligas para correção de composição química, desoxidação e dessulfuração do banho. (RIZZO, 2006).

As operações envolvidas durante o processo do refino secundário são realizadas em um equipamento chamado forno panela, constituído de um sistema contendo 3 eletrodos (com funcionamento semelhante ao do FEA), (FRUEHAM, 1986) que são acoplados sobre a panela de aço, onde é possível ajustar a composição química e a temperatura do banho metálico, conforme o esquema na Figura 4:



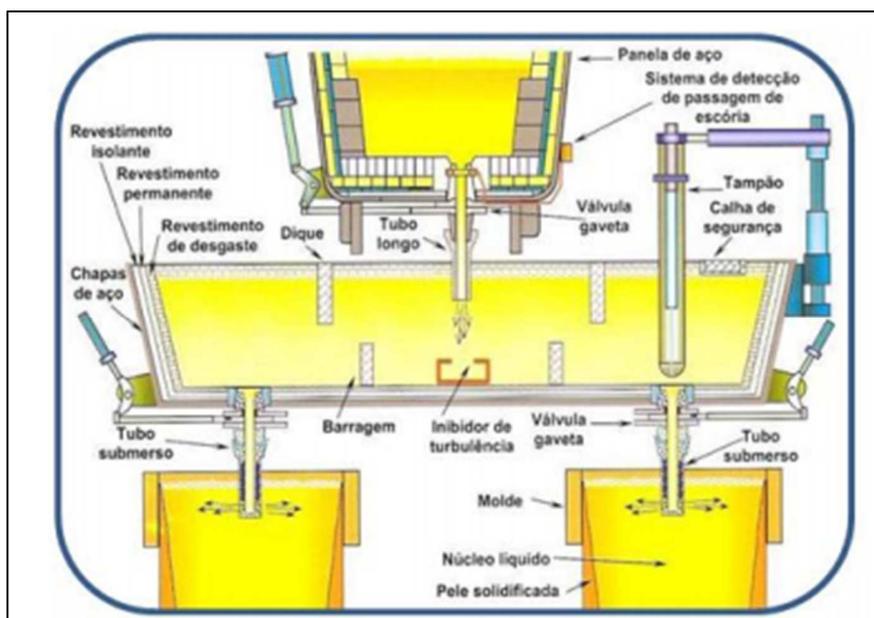
**Figura 4:** Esquema de funcionamento de um forno panela. Fonte: (RIZZO, 2006).

Após o acerto da composição química e da temperatura, a panela é transportada até o setor de Lingotamento Contínuo.

### 3.1.4 LINGOTAMENTO CONTÍNUO

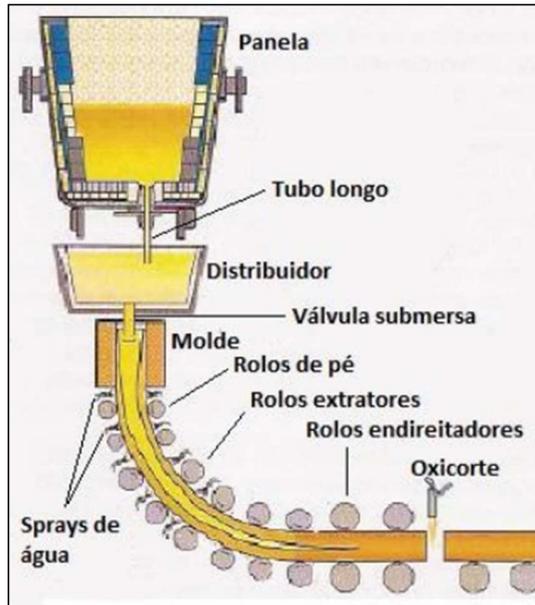
O processo de lingotamento contínuo (LC) é o último estágio da aciaria onde o aço ainda está na forma líquida. O seu principal objetivo é solidificar o aço em forma de tarugos (no caso da usina Riograndense), para que possa ser utilizado na etapa de laminação.

O sistema constitui-se do vazamento do aço por um sistema conhecido como válvula gaveta. Na máquina de lingotamento a panela é posicionada sobre um equipamento chamado distribuidor, que é um recipiente formado por uma carcaça metálica revestida por refratários e tem como funções principais armazenar o aço líquido entre a panela e os moldes e alimentar os veios da máquina (ALMEIDA, 2012), conforme a Figura 5:



**Figura 5:** Componentes geralmente utilizados em um distribuidor de LC  
Fonte: (RIZZO, 2006).

O aço do distribuidor é vazado pelos veios para o molde, que é considerado a etapa mais crítica do LC, pois nele ocorre o início da solidificação do aço líquido, sendo o molde o definidor do perfil do produto (MOURÃO 2007).



**Figura 6:** Representação esquemática de uma máquina de lingotamento contínuo. Fonte: (RIZZO, 2006).

Como pode ser observado na Figura 6, as máquinas de lingotamento possuem um sistema de rolos que servem para suportar o peso do tarugo e direcioná-los para fora da máquina, dando lugar ao aço que entrando no molde. Após essa etapa, o tarugo (Figura 7) é cortado na dimensão especificada e está pronto para os processos posteriores de conformação mecânica.



**Figura 7:** Tarugos produzidos no final do lingotamento contínuo. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

## **3.2 REFRACTÁRIOS**

O processo siderúrgico envolve temperaturas muito elevadas, e só é possível devido aos revestimentos cerâmicos refratários (ARAÚJO, 1997).

Pode-se definir o material refratário como uma substância infusível às mais altas temperaturas que se espera atingir em serviço. Além disso o material deve ser resistente a altas temperaturas e mudanças bruscas de temperaturas, pressão, combinação química, sendo, ao mesmo tempo mau condutor de calor e eletricidade. (SILVA, 2011)

Os principais constituintes dos refratários são:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , todos esses óxidos são infusíveis nas temperaturas comuns na metalúrgica, entretanto, podem se tornar mais ou menos ativos quando juntos uns com outros. (SCHACHT, 2004)

Segundo COUTINHO (2000) o projeto de revestimento refratário consiste no uso dos diferentes tipos e classes de materiais refratários envolvidos em um equipamento, que venham refletir numa adequação técnica e econômica às condições específicas de trabalho do mesmo.

Devem ser observadas algumas variáveis do uso do material, tais como o ponto de vista geométrico, dimensional, estrutural do equipamento e solicitações mecânicas sobre o revestimento.

Levando em conta esses fatores, pode-se definir o tipo e quantidade do material e a geometria ideal da peça refratária.

### **3.2.1 PANELAS DE AÇO**

As panelas de aço são as responsáveis por manter o aço líquido logo após o vazamento do FEA (Figura 8) e durante as etapas de refino secundário e lingotamento contínuo. Sua integridade é fundamental para o correto funcionamento do sistema produtivo da aciaria.



**Figura 8:** Panela com aço em estado líquido, logo após o vazamento do FEA.  
Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

Em panelas de aciaria elétrica destinada a produção de aços longos, usualmente são utilizados refratários Dolomíticos como revestimento de trabalho das panelas utilizadas no processo (LANDY, 2004)

Secundo OLIVEIRA (2005), as demandas impostas sobre o revestimento refratário dependem de cada região e é necessário que o projeto contemple um refratário com propriedades e dimensões compatíveis a cada uma das solicitações.

Os revestimentos moldados se dividem em dois tipos: tijolos de segurança (permanentes) ou tijolos de trabalho (tijolo que fica em contato direto com o metal líquido, escória, gases e outros agentes).

A classe não moldada pode-se denominar de backfill, onde segundo CASSÉTE (2000) deve ser compatível com o tijolo de trabalho e não deve ultrapassar 20 mm de espessura, para que garanta suas duas funções básicas: proteger o refratário permanente contra infiltrações de aço ou escória e não permitir que o revestimento de trabalho se desloque contra a chapa metálica no momento do aquecimento da panela.

A parte do revestimento que tem contato direto com a escória na maior parte do período que abrange uma corrida é chamada de LINHA DE

ESCÓRIAS. Pode-se dizer que o fator limitante de vida do revestimento de muitas usinas está localizado justamente nessa linha, devido a corrosão devido a escória (CARVALHO NETO, 1989). Por estar mais exposta a escória que as outras zonas da panela, essa região é onde ocorre a maior taxa de desgaste da panela.

A zona compreendida entre a zona de linha de escórias e a linha de metal é denominada LINHA DE TRANSIÇÃO, seu objetivo é potencializar a ancoragem do tijolo da linha de escórias.

A região da BORDA LIVRE, localizada logo acima da linha de escórias está sujeita a oxidação, temperaturas elevadas, choque térmicos e ataque químico. O próprio uso do forno panela pode gerar desgaste devido ao arco elétrico nessa região e acabar limitando a vida da panela.

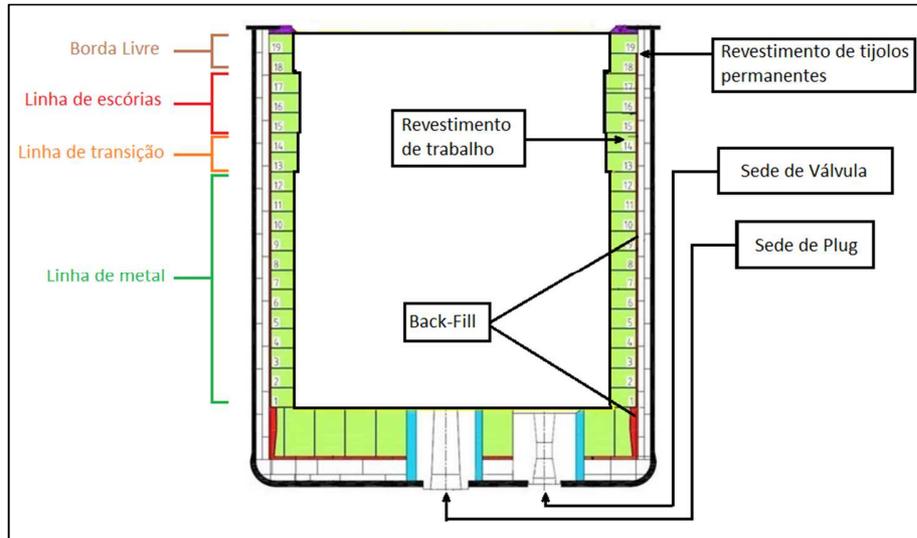
O revestimento de trabalho que fica em contato com o aço líquido na maior parte do tempo é denominado LINHA DE METAL. Teoricamente é a região de menor desgaste da panela, devido ao fato do aço não ser tão corrosivo quanto a escória.

A sede de plugue, responsável por acomodar o plugue de rinsagem, e a sede de válvula, responsável por acomodar a válvula superior e o sistema de válvula gaveta, são peças pré-moldadas de concreto de baixo cimento, alumina-MgO, alumina-cromo, alumina-espinélio e suas variações (MAGNESITA, 2016).

O esquema de montagem de uma panela da usina Riograndense pode ser descrito pela Figura 9. Pode-se observar que a panela apresenta 19 fiadas. Ela consiste de uma carcaça metálica revestida com diversas camadas de refratários.

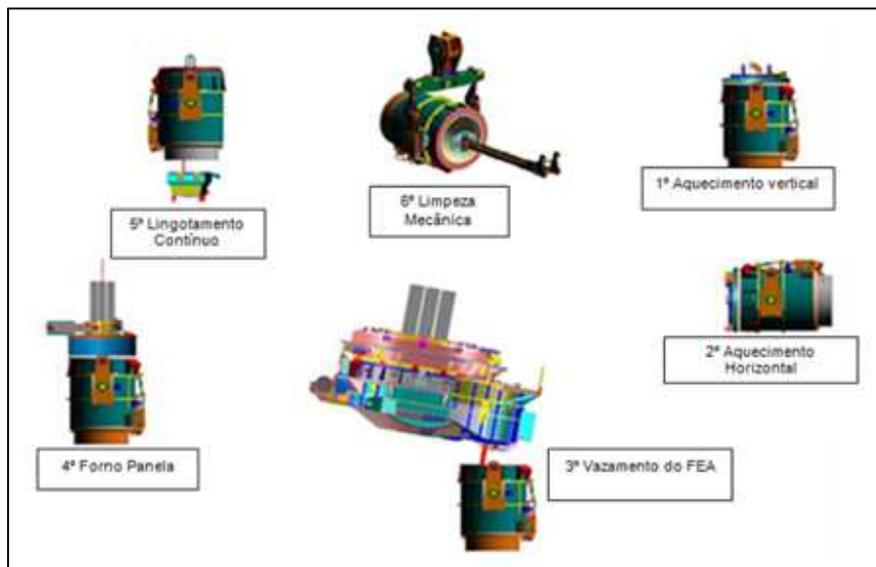
Os tijolos representados em verde são tijolos de trabalho, depois temos o backfill, seguido de um duplo revestimento de tijolos permanentes.

No fundo da panela, tem-se as sedes de plugue e de válvula.



**Figura 9:** Esquema em corte de uma panela de aço de aciaria elétrica.

Após ser montada, no setor de refratários, a panela é aquecida em um aquecedor a gás natural seguindo uma curva específica de temperatura por 10 horas. Após esse período de aquecimento, a panela (com aproximadamente 1000°C) é enviada para o FEA onde o aço é vazado para dentro da panela, seguindo então por todas as etapas descritas na Figura 10.



**Figura 10:** Ciclo Operacional de Panela em uma aciaria elétrica. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

O período em que o aço é vazado na panela até o momento onde ela é limpa na baía (Figura 11) após ser esvaziada no LC é denominado corrida. Cada ciclo de corrida significa que a panela passou por todo o ciclo produtivo da aciaria.



**Figura 11:** Momento em que ocorre a limpeza do sistema de rinsagem da panela após a mesma ter realizado uma corrida. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

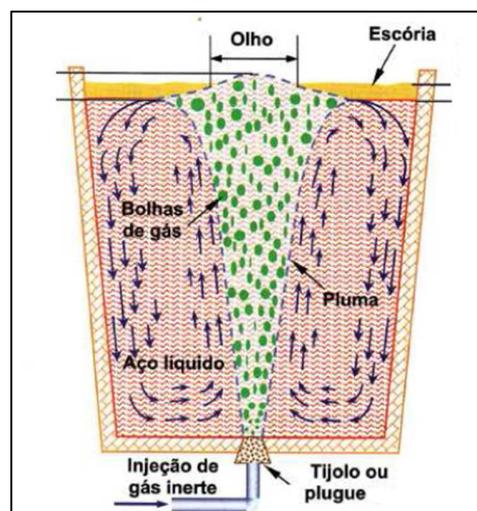
Como procedimento padrão, existem três situações em que a panela obrigatoriamente tem que retornar ao setor de refratários para que seu revestimento refratário seja refeito (Padrão de Operação da GERDAU Riograndense):

1. Atingir 280 corridas de vida
2. Revestimento refratário de trabalho apresentar desgaste acentuado em alguma região (falha no revestimento principal de trabalho)
3. Sede de Plugue atingir residual de 200 mm

### 3.2.2 SISTEMA DE RINSAGEM

É muito importante que exista a correta homogeneização dos elementos de liga no aço líquido, para que isso seja possível, na aciaria Riograndense, usa-se o sistema de agitação por borbulhamento de gases inertes: Argônio ( $Ar$ ) e Nitrogênio ( $N_2$ ).

Este modo de agitação é um dos processos mais comuns de metalurgia em panela e é muito utilizado nas aciarias (Curso ABM, 2004). A injeção de gases é normalmente feita por tijolo (ou plugue) poroso, mas pode ser feita também por lança, neste caso podendo ser com furo simples ou duplo ou ponta com refratário poroso. A representação da evolução dos gases em meio ao aço líquido é mostrada na Figura 12, para o caso de borbulhamento através de tijolo poroso posicionado no centro da panela.



**Figura 12:** Fluxo de aço com injeção de gás pelo fundo (RIZZO, 2006).

As principais finalidades desse sistema de agitação do aço líquido na panela são:

- Homogeneização da composição química e temperatura.
- Dissolução das adições.
- Desoxidação e dessulfuração.
- Flotação de inclusões.

### 3.2.3 PLUGUE DE RINSAGEM

O plugue é um importante componente do Sistema de Injeção de Gases. Ele é instalado no fundo das painéis de aço, tornando possível a agitação do banho e assim auxiliando nos tratamentos metalúrgicos (MAGNESITA, 2016).

No estudo, foram usados plugues porosos, que são aqueles em que o elemento refratário é constituído de um tijolo de alta porosidade, não direcional.

Os plugues porosos (Figura 13) garantem uma excelente rinsagem durante a operação, porém apresentam maior desgaste durante o processo.



**Figura 13:** Esquema simplificado de um plugue poroso.

Os plugues porosos geralmente são fabricados tanto com refratários de alta alumina quanto com magnesianos e, tradicionalmente, são obtidos por prensagem e queima em elevadas temperaturas. A porosidade desses plugues é obtida pela adição de elementos *burn-out* ou por meio de uma granulometria ajustada para essa finalidade (Magnesita, 2016).

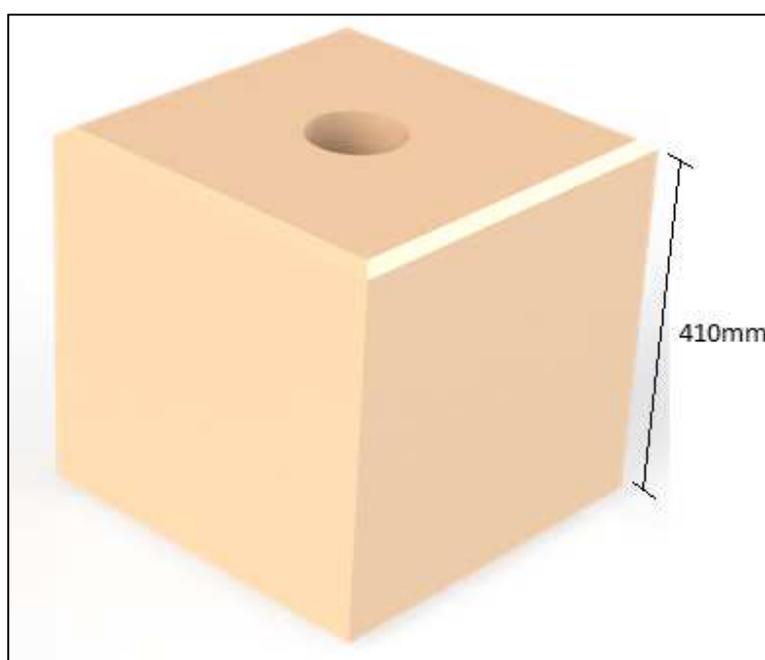
Para que se tenha um bom desempenho dos plugues refratários é necessário um cuidado extra com a sede de plugue, às técnicas de reparação, aos cuidados na limpeza do plugue e sede no intervalo entre as corridas.

O plugue tem 410 mm de comprimento, sendo que seu residual mínimo de segurança é de 200mm. Quando o residual de segurança é atingido, o operador responsável pela manutenção da panela precisa trocá-lo imediatamente. Para garantir que a sede de plugue não seja desgastada severamente.

### 3.2.4 SEDE DE PLUGUE

A sede de plugue é o equipamento responsável por acomodar o plugue no fundo da panela. Ela é constituída normalmente por um concreto refratário de alta alumina pré-moldado e fibras metálicas (MAGNESITA, 2010).

As sedes de plugue que foram usadas nesse estudo eram de 410 mm de altura e está representada na Figura 14.



**Figura 14:** Formato usual de uma sede de plugue.

Existem diversos motivos para que a sede de plugue seja desgastada, geralmente, a taxa de desgaste é influenciada pela erosão entre o aço líquido sobre o equipamento, a corrosão ocasionada pela escória e fenômenos de choque térmico oriundos de mudanças bruscas de temperatura na região que podem ocorrer ao longo da vida útil do material. (Magnesita, 2016)

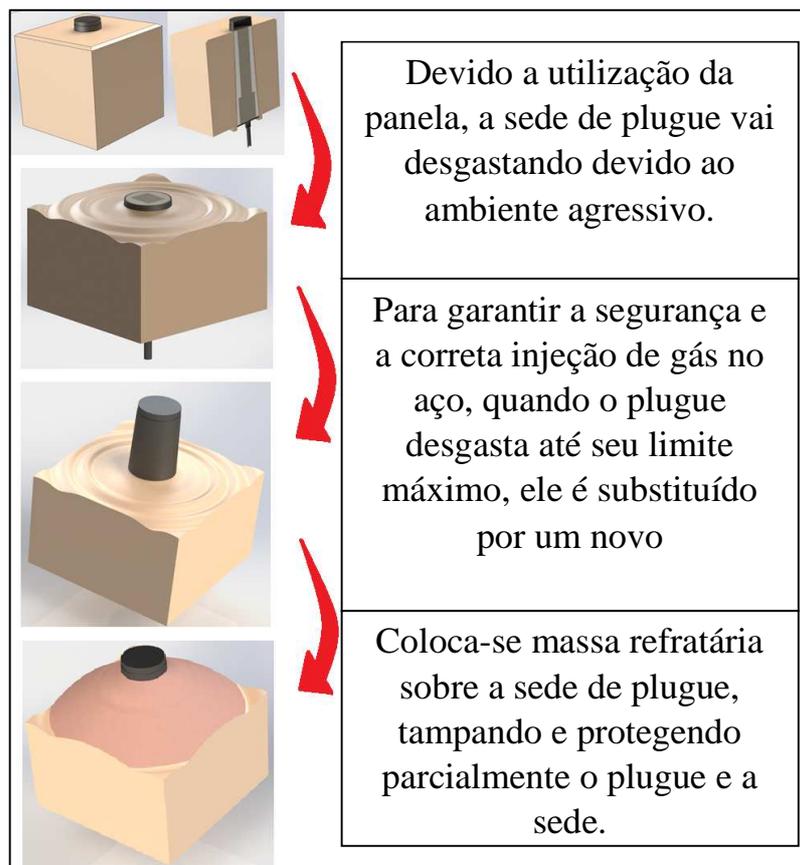
Conforme descrito no item 3.2.1, um dos motivos de uma panela sair de operação é quando a mesma é desgastada até atingir 200mm de altura, esse é o

residual mínimo de segurança de um plugue, e por padrão de operação da usina, sempre que uma panela atinge residual inferior a 200mm, o equipamento deve ser retirado imediatamente de operação para não comprometer a segurança.

### 3.2.5 REPARO EM SEDE DE PLUGUE

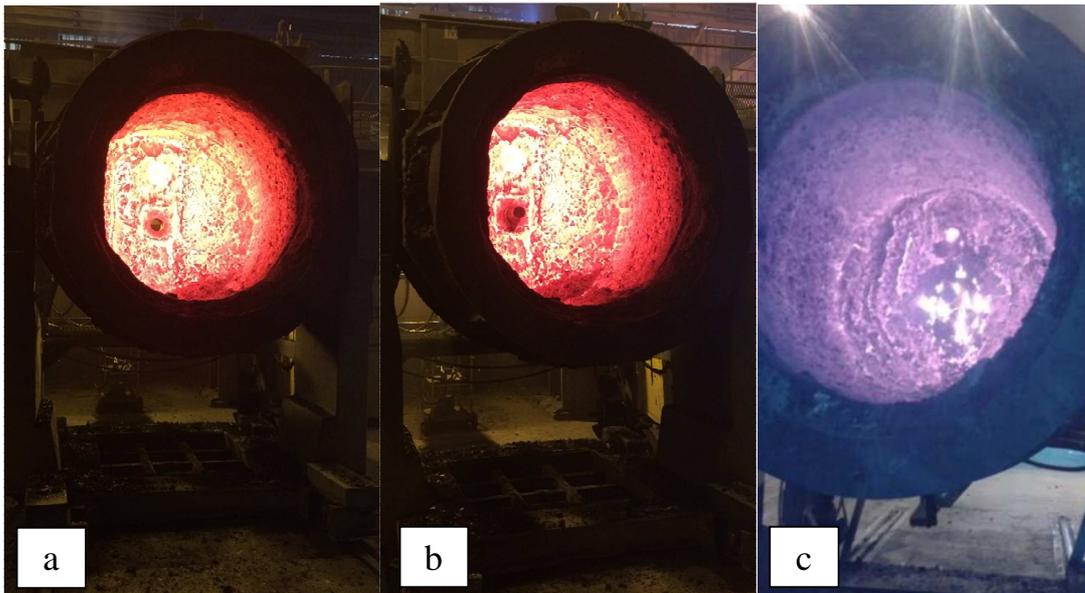
Devido à importância da integridade da sede de plugue, tem-se por prática a realização do reparo da sede sempre que o plugue da panela for trocado.

Dessa forma, os mecanismos de desgaste da sede de plugue (corrosão devido o contato com a escória (PRETORIUS, 1998), impacto do aço líquido na hora do vazamento do forno e abrasão oriunda do fluxo de aço líquido o fundo da panela) irão desgastar a massa utilizada para revestir a sede e não a própria sede. O fluxo do processo de manutenção da sede de plugue pode ser descrito na Figura 15.



**Figura 15:** Esquema de aplicação do revestimento de reparo na sede de plugue.

Na prática, após a panela ter seu conteúdo de aço esgotado no lingotamento contínuo, a mesma é inspecionada e caso seja necessária a troca do plugue, a panela é posicionada em um suporte, chamado de trole, onde o plugue gasto é substituído por um novo (Padrão de operação Gerdau Riograndense). Conforme a Figura 16.



**Figura 16:** Panela posicionada no trole para inspeção e substituição de equipamentos refratários. (a) Panela com o plugue gasto já retirado. (b) panela com plugue novo. (c) plugue novo já com a massa de reparo. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

### 3.2.5.1 APLICAÇÃO DA MASSA DE REPARO

Após o plugue novo ser instalado na sede de plugue, a panela é posicionada na vertical embaixo da plataforma de realização de reparo. As etapas a que se seguem dependem do tipo de massa utilizada para a realização do reparo. Os processos descritos a seguir são baseados na instrução operacional fornecida pelo fabricante de material refratário.

### 3.2.5.2 APLICAÇÃO DA MASSA DE REPARO DO TIPO CONVENCIONAL

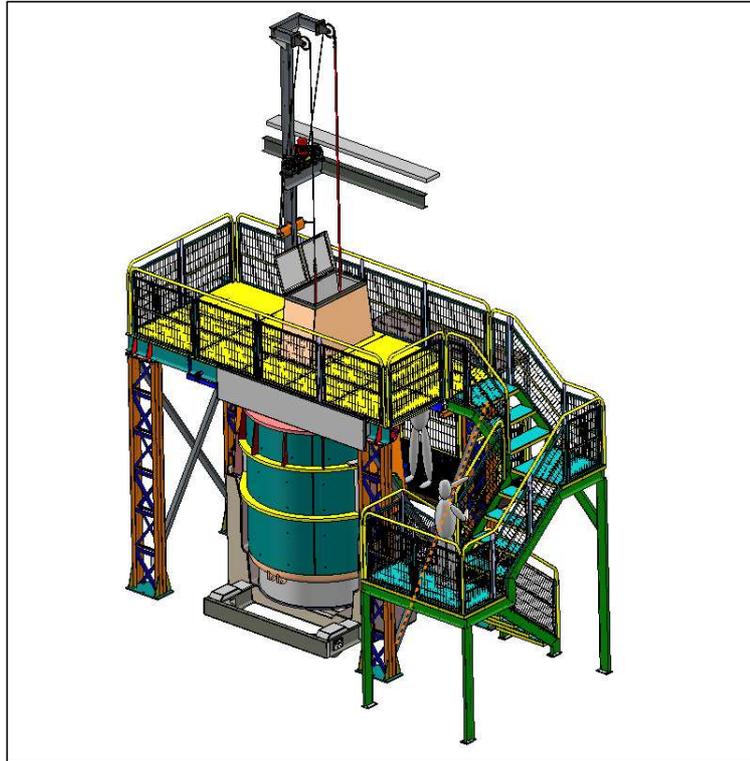
A massa refratária seca chega até a usina em sacos contendo, cada um, 25 kg de massa, o saco é aberto e a massa refratária é colocada no misturador da Figura 17.



**Figura 17:** Misturador de massa e reparo. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

Com o misturador ligado, é adicionado aproximadamente 10% de água (em massa) na mistura, até ela ficar com um aspecto cremoso. Essa análise é puramente visual e serviu como motivo da busca por uma nova alternativa de material.

Após aproximadamente 5 minutos de mistura, retira-se a massa do misturador e a mesma é vertida sobre a sede de plugue através de uma abertura na plataforma demonstrada na Figura 18 (plataforma) e Figura 19 (abertura de aplicação de reparo).



**Figura 18:** Desenho da plataforma de aplicação do reparo. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).



**Figura 19:** Abertura usada para jogar massa de reparo sobre a sede de plugue com a panela posicionada abaixo da plataforma de reparo. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

Esse processo, além de ser inconstante, pois o tempo de mistura e a quantidade de água dependem inteiramente do operador responsável pelo reparo é extremamente desgastante para o operador.

Uma vez que a panela está a aproximadamente 900°C abaixo da plataforma, aumentando consideravelmente a temperatura ambiente onde o operador está exposto. Ocorre também um alto desperdício de material, uma vez que boa parte da massa fica grudada no misturador e no balde.

Após a massa ser vertida sobre a sede de plugue, deixa-se a panela parada por aproximadamente 40 minutos para garantir a cura da massa refratária. Em seguida, a mesma é enviada de volta ao processo.

### 3.2.5.3 APLICAÇÃO DA MASSA DE REPARO DO TIPO CONCRETO DE FLUÊNCIA LIVRE

A massa do tipo concreto de fluência livre chega na usina em balde lacrado contendo 2 (dois) sacos com 10 kg cada de massa previamente misturada, na composição ideal para a aplicação na panela.

Dessa forma o operador fica menos tempo exposto ao ambiente desgastante da plataforma de reparo, o procedimento que antes levava em torno de 10 minutos, agora leva em torno de 2 minutos. Tempo necessário para que o balde seja aberto e os sacos sejam jogados sobre a sede de plugue, conforme a Figura 20.



**Figura 20:** Massa de fluência livre com composição previamente acertada pelo fornecedor sendo aplicada. Fonte: (cortesia GERDAU S.A).

## 4. MATERIAIS E METODOS

Por motivo de segredo industrial, as amostras serão descritas a seguir com nomes genéricos. As características das massas analisadas estão evidenciadas na tabela 1.

**Tabela 1:** Relação de massas analisadas.

Amostra	Tipo	Modo de cura	Empresa
AL-1	Aluminosa	A frio, com água	A
AL-2	Aluminosa	A frio, com água	B
Mag-1	Magnesiana	A frio, com água	A
Mag-2	Magnesiana	A Quente, com resina	A

As amostras de massa de reparo de sede de plugue, descritas na tabela 1, foram analisadas visualmente (sem ampliação) e com uso de lupa eletrônica e software de análise de imagens. Suas características foram documentadas e pesquisou-se sobre as peculiaridades encontradas em cada massa.

A análise microestrutural das massas foi realizada através de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Hitachi, TM3000) com apoio de análise de composição elementar pontual com microsonda EDS (Espectroscopia por energia dispersiva de raios-X) (Oxford Instruments, modelo SwiftEDS3000) acoplada ao microscópio eletrônico. A avaliação de fases presentes foi realizada em análises no difratômetro Phillips modelo X'Pert MPD. Para esta análise, as amostras foram obtidas por corte a seco e o polimento foi igualmente realizado à seco, com lixas de grana crescente (de 100 a 1200).

Foi feita a análise da distribuição granulométrica das massas em peneiras ABNT e cálculo do diâmetro médio de partícula (método de Sauter).

O diâmetro médio de partícula foi calculado pela fórmula de Sauter:

$$D \text{ médio} = \frac{1}{\sum(x_i/dpi)}$$

**Equação 2:** Fórmula de Sauter.

Onde:

$x_i$ : fração mássica de sólidos com diâmetro  $d_{pi}$

$d_{pi}$ : diâmetro médio de abertura de peneira

Para análise de resistência mecânica foram preparados corpos de prova cilíndricos de 300g de material, com a massa misturada com cerca de 35 ml de água, avaliando-se a consistência das massas. Então foi feito teste de resistência à compressão (taxa de 5mm/min). De acordo com a norma ASTM C133-97.

Em um primeiro grupo, as massas foram preparadas e deixadas a temperatura ambiente,  $\sim 22^\circ\text{C}$  por 72h, e realizaram-se os ensaios após a cura e a secagem. Em outro grupo, as peças foram preparadas e colocadas à úmido no forno, sendo queimadas em forno com patamar de 120 min a  $1400^\circ\text{C}$ , com taxa de aquecimento de  $300^\circ\text{C/h}$ .

Desse modo, utilizou-se uma alta taxa de aquecimento para se ‘simular’ a condição de aquecimento industrial, já que as massas são vertidas sobre a sede na panela ainda aquecida.

Avaliou-se também a absorção de água, a porosidade e a densidade para cada uma das massas. Para tanto, foram ensaiadas amostras das massas preparadas à temperatura ambiente e amostras queimadas a  $1400^\circ\text{C}$ . Utilizou-se a norma NBR 6220.

A avaliação da fluidez da massa foi realizada através do índice de Hausner, o qual fornece um índice de “travamento” da massa.

O índice de Hausner (IH) é medido pela divisão entre a densidade vibrada ( $D_v$ ) (considerando o volume após vibração em um cilindro graduado) e a densidade aparente ( $D_{ap}$ ) (considerando o volume ocupado diretamente pelo pó vertido no recipiente).

$$D_v / D_{ap} = IH$$

**Equação 3:** Índice de Hausner

O atrito entre as partículas e aglomerados diminui a fluidez. Se o atrito for maior, a diferença entre a densidade vibrada e a aparente também será e, conseqüentemente, o IH será maior.

Um elevado valor de IH representa, portanto, uma baixa fluidez. O valor do IH de um pó também é influenciado pela umidade do pó e sua distribuição granulométrica.

Devido à carência de normas técnicas para avaliação da adesividade de revestimentos refratários foi tomada como base a metodologia utilizada para ensaiar concretos convencionais no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) da UFRGS.

O ensaio descrito na norma ABNT NBR 13528:2010 de Revestimentos de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação de aderência à tração consiste em aplicar a massa a ser avaliada sobre o substrato de interesse, esperar a cura adequada e, com auxílio de serra copo, fazer furo em formato de copo e profundidade até a interface entre a massa e o substrato.

Medir a área do topo do cilindro gravado sobre a superfície da massa e, com cola a base de resina epóxi, colar a pastilha adequada ao ensaio sobre o topo do cilindro gravado.

Esperar o tempo indicado para a secagem da cola, medir a área e então realizar o ensaio de tração com equipamento adequado como mostrado na Figura 21, podendo ser analisado o local onde ocorreu a fratura e a tensão de ruptura.



**Figura 21:** Equipamento utilizado no teste de determinação de aderência à tração.

Após a realização dos testes em laboratório, verificou-se a eficiência das massas refratárias diretamente na planta siderúrgica.

Foram selecionadas as massas Al-1 e a Mag-2, e ambas foram utilizadas, sob as mesmas condições de operações no período de 31 de março até 14 de abril de 2016.

Para a análise futura dos dados, foram desconsiderados os resultados dos últimos plugues utilizados no final da vida útil da panela, assim como a vida dos primeiros plugues das panelas (os primeiros plugues não necessitam de massa de reparo, pois a sede de plugue está nova).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

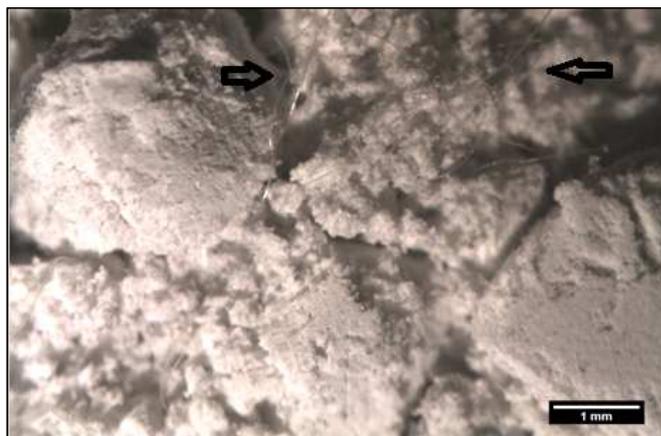
### 5.1 ANÁLISE VISUAL

Como pode ser visto na Figura 22, as massas AL-1 da EMPRESA A e AL-2 da Empresa B se assemelham. No entanto, a massa AL-2 apresenta maior quantidade de agregados que a AL-1. Além disso, a massa AL-2 possui pequenos filamentos misturados ao pó cerâmico.



**Figura 22:** Análise visual das massas refratárias de reparo de sede: AL-1 (Empresa A), AL-2 (EMPRESA B).

A Figura 23 apresenta a imagem em Lupa (aumento de 5x) para investigar as fibras finas presentes na massa de reparo AL-2. O software Image-J foi utilizado para medir a espessura das fibras e tamanho dos agregados presentes na massa.



**Figura 23:** Imagem da massa de reparo de sede AL-2 (EMPRESA B) em Lupa, em detalhe a presença de fibras.

Os agregados maiores têm diâmetro de ~ 3,5 mm e as fibras espessura de cerca de 0,03 mm.

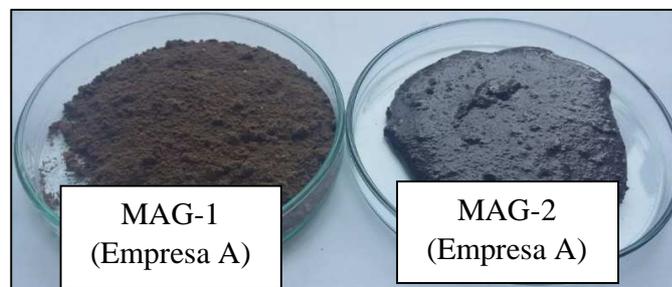
Como é conhecido, as fibras poliméricas são utilizadas em massas e concretos refratários para facilitar o processo de secagem, tornando-o mais rápido e evitando a formação de tensões residuais e trincas. (SCHACHT, 2004)

Uma vez que a massa Al-1 não apresentou fibras poliméricas e o tamanho dos agregados é bastante homogêneo, não se fez necessária a análise com lupa eletrônica em detalhe.

As massas MAG-1 e MAG-2 da Empresa A tem aparência diferente, tanto entre si quanto das citadas anteriormente.

A MAG-1, assim como a AL-1 e a AL-2 é uma massa seca e com tamanho de grãos aparentemente similar, no entanto, a MAG-1 apresenta coloração diferente e menos homogênea.

Já a MAG-2 tem aparência totalmente distinta, uma vez que já vem resinada de fábrica (Figura 24).



**Figura 24:** Análise visual das massas refratárias de reparo de sede MAG-1 e MAG-2.

## 5.2 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA SEMI-QUANTITATIVA

As amostras de AL-1 (Empresa A) e AL-2 (EMPRESA B) apresentam em sua composição principalmente fases contendo alumínio e cálcio, típicas de concretos refratários aluminosos.

Já as amostras de MAG-1 (Empresa A) e MAG-2 (Empresa A) são majoritariamente magnesianas e ambas provavelmente contêm fases fundentes, comuns em massas refratárias, sendo que na primeira a fase fundente provavelmente contém ferro, enquanto que na segunda a fase fundente provavelmente contém alumínio.

A análise de composição semi-quantitativa também indica que a MAG-1 (Empresa A) contém fases de cromatos, as quais auxiliam na resistência à quente, melhorando o desempenho das massas magnésicas (SONAGLIO, 2011).

A MAG-2, por sua vez, contém maior concentração de fases contendo sílica, que facilitam a sinterização em menor temperatura, mas podem diminuir a resistência à quente. (Tabela 2).

**Tabela 2:** Composição química das massas AL-1 (Empresa A), AL-2 (EMPRESA B), MAG-1 (Empresa A) e MAG-2 (Empresa A).

Amostras	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
AL-1 (Empresa A)	82,8	15,8	0,9	0,2	0,0	-
AL-2 (EMPRESA B)	83,1	15,1	1,1	0,2	0,2	-
MAG-1 (Empresa A)	1,0	1,5	1,3	1,9	92,6	1,5
MAG-2 (Empresa A)	4,8	1,5	3,5	1,5	88,6	-

### 5.3 ANÁLISE MINERALÓGICA

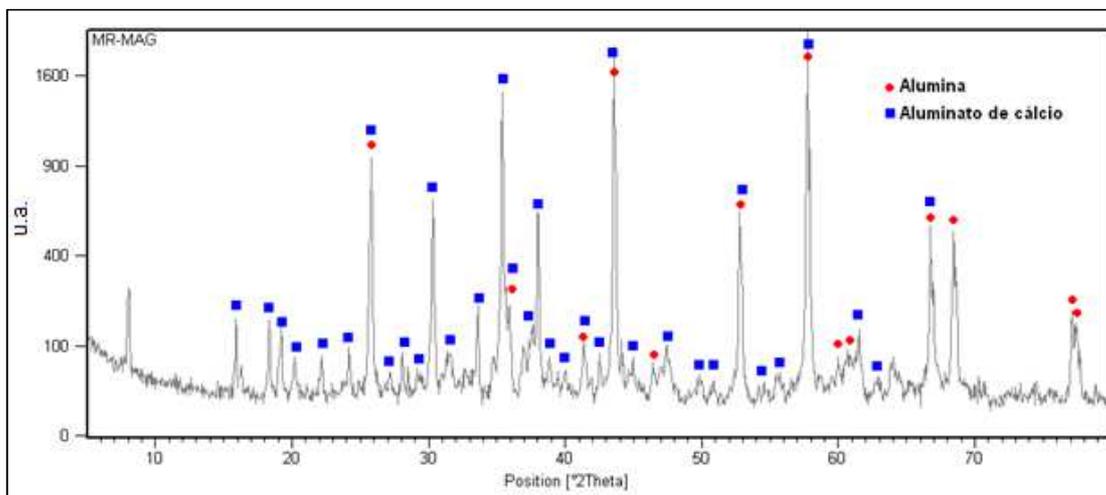
A análise mineralógica das massas refratárias (AL-1, AL-2, MAG-1 e MAG-2) realizada por difração de raios X (DRX) mostrou que as massas AL-1 e AL-2 tem fases similares, enquanto que tanto a massa MAG-1 quanto a massa MAG-2 apresentam diferenças significativas das demais.

As massas AL-1 e AL-2 são compostas majoritariamente por Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Aluminato de cálcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ) (Figura 25 e 26 respectivamente).

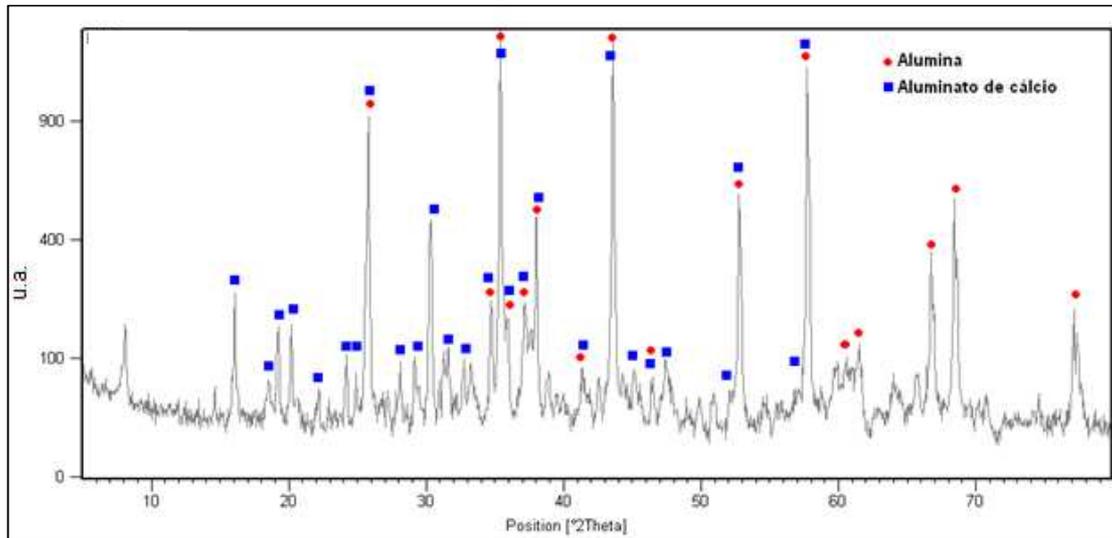
O aluminato de cálcio compõe a matriz e é a parte responsável pela ligação (pega) do concreto. (SCHACHT, 2004)

Já os agregados e partículas menores são de alumina, compõem o restante da massa e são os responsáveis pela resistência estrutural das peças.

Assim como a composição química essas massas não apresentaram diferenças significativas em suas fases.

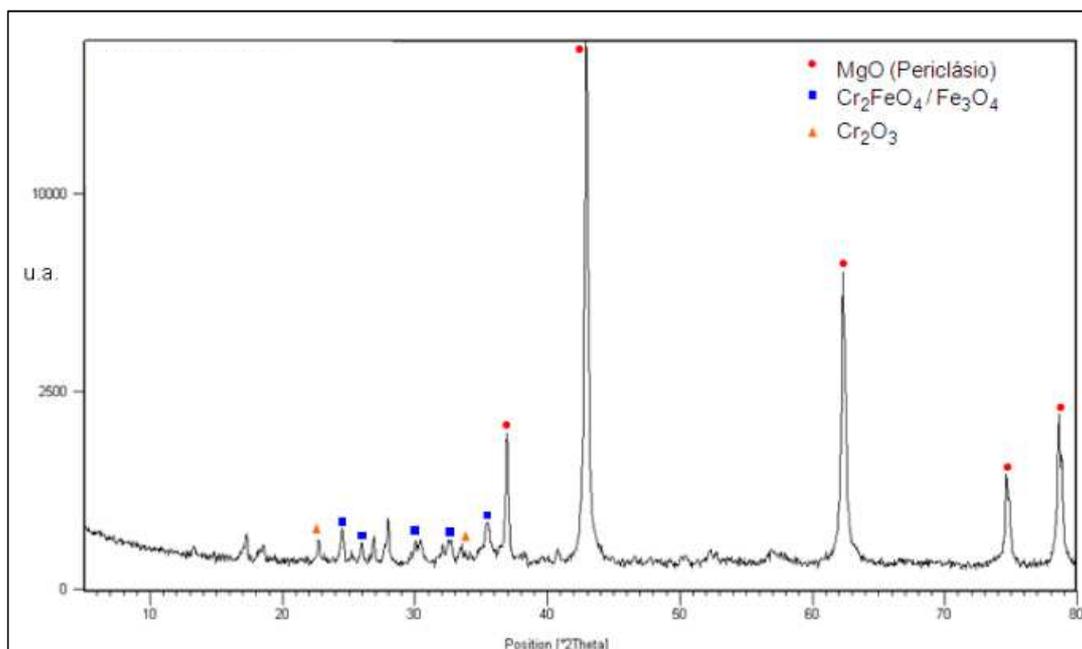


**Figura 25:** Análise das fases componentes da massa AL-1 por DRX.



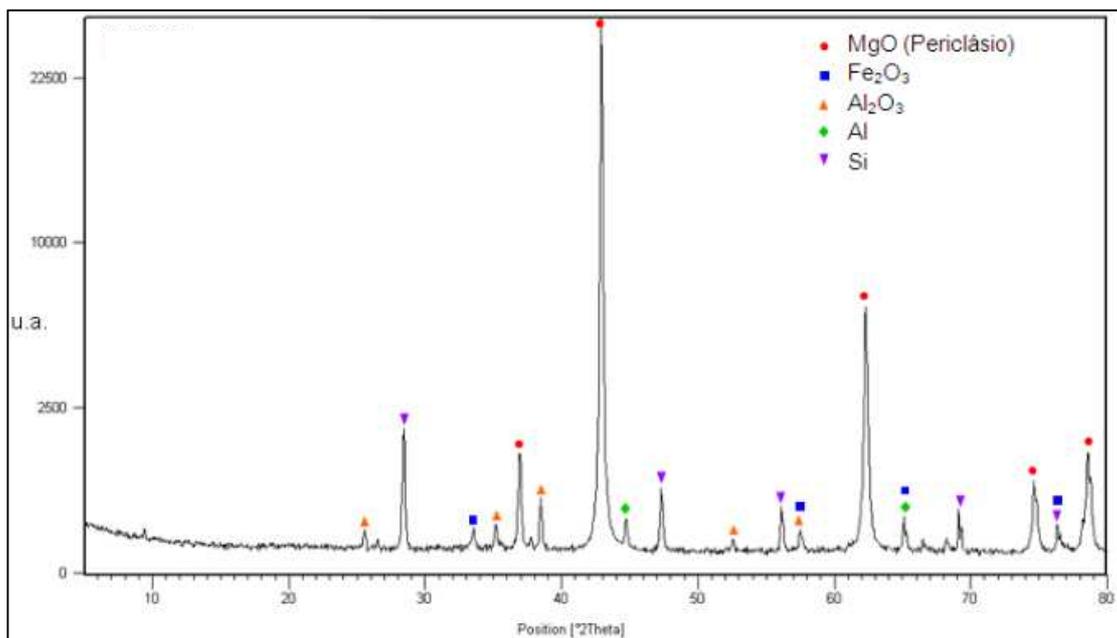
**Figura 26:** Análise das fases componentes da massa AL-2 por DRX.

A análise mineralógica da massa MAG-1 (Figura 27) mostra que as principais fases presentes são periclásio (MgO), espinélio de ferro e cromo ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).



**Figura 26:** Análise das fases componentes da massa MAG-1 por DRX.

Já a massa de reparo MAG-2 (Figura 28), apresenta principalmente periclásio (MgO), contém outras fases minoritárias como alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e provavelmente antioxidantes com Al e Si, o que está de acordo com o a análise de composição química.

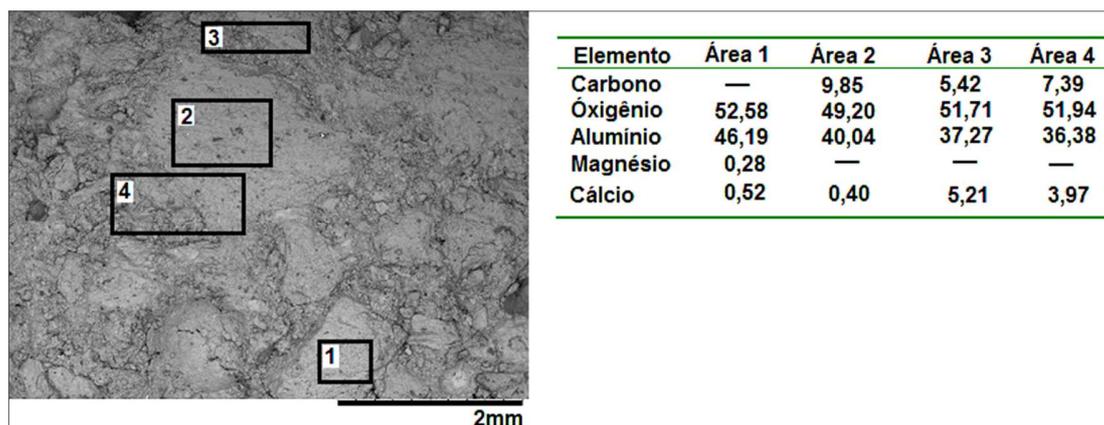


**Figura 27:** Análise das fases componentes da massa MAG-2 por DRX.

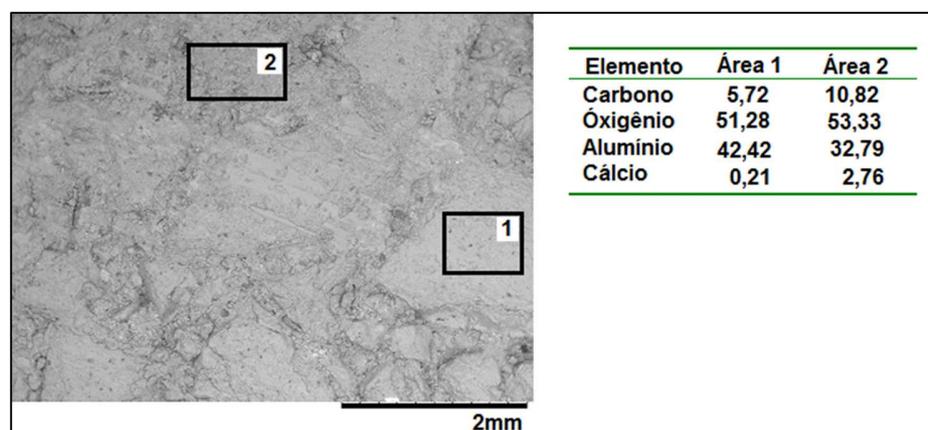
#### 5.4 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS MASSAS SINTERIZADAS A 1400°C

As análises microestruturas das massas AL-1 e AL-2 (Tabela em anexo as Figuras 29 e 30) indicam que elas possuem microestrutura muito semelhante, apresentando uma boa distribuição de agregados e presença de grande concentração de alumínio.

Além deste elemento, destaca-se a presença de teores de cálcio nas regiões da matriz (Figura 29 (área 2) e Figura 30 (área 3)). Isso indica a que a microestrutura de ambas as massas é composta de grãos de Alumina em uma matriz de Alumina e Aluminato de Cálcio.



**Figura 29:** Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa AL-1 sinterizada a 1400°C.



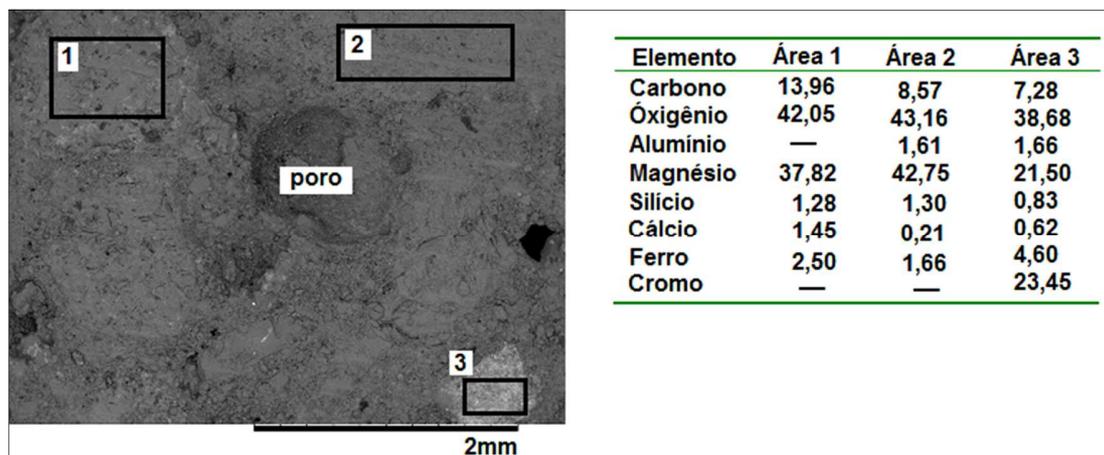
**Figura 30:** Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa AL-2 sinterizada a 1400°C.

As análises microestruturais da massa MAG-1 mostraram maior porosidade em relação às demais.

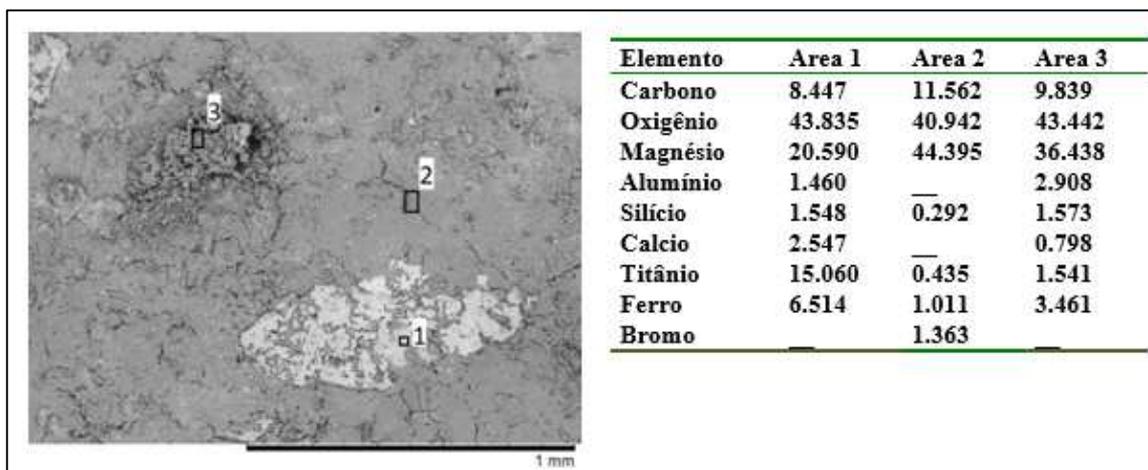
No entanto, a análise química indica que a massa MAG-1 é bem distinta, sendo composta principalmente pelos elementos magnésio, oxigênio e cromo. Além destes elementos principais, observa-se a presença de cálcio, alumínio, silício e ferro.

O ferro juntamente com o cálcio e o silício favorece a formação de fases de baixo ponto de fusão e conseqüentemente o aumento de resistência mecânica da massa.

A grande concentração de cromo (Figura 29 - área 3) provavelmente é uma partícula de impureza presente na estrutura da massa, haja visto que esta partícula foi localizada isoladamente na estrutura.



**Figura 28:** Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa MAG-1 sinterizada a 1400°C.



**Figura 29:** Microestruturas (MEV) e composição química elementar pontual (EDS) da massa MAG-2 sinterizada a 1400°C.

A massa MAG-2 é claramente a massa com maior quantidade de impurezas. Assim como a Mag-1 é uma massa refratária magnesiana e da mesma forma contém uma série de impurezas como cálcio, alumínio, silício, ferro e bromo. A presença de Titânio em todas as regiões analisadas também é notável.

## 5.5 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A massa AL-2, como identificado na análise visual, apresenta maior quantidade de agregados de maior tamanho (maior percentual de partículas de diâmetro superior a 0,85 mm – retido na peneira ABNT 20#) em relação ao encontrado na massa AL-1.

No entanto, a massa da EMPRESA B apresenta um maior percentual de finos, cujo diâmetro de partícula é inferior a 0,09mm (Figura 33, Figura 34, Figura 35). Portanto, a massa da Empresa A tem a distribuição de tamanho de partículas mais homogênea que a da EMPRESA B.

Os dados granulométricos permitiram o cálculo do tamanho médio de partícula pelo método de Sauter: Dp médio 0,429 mm para a AL-1 e Dp médio 0,615 mm para a AL-2. Assim sendo, uma diferença importante entre as massas dos dois fabricantes.

Agregados de maior tamanho propiciam em geral uma maior resistência à corrosão e ao desgaste. Uma granulometria mais grosseira facilita também a secagem do concreto. A AL-2 possui uma quantidade de finos significativamente maior, o que pode retardar a secagem.

Em princípio, a presença de fibras na massa da EMPRESA B deve garantir uma secagem satisfatória. Por outro lado, a presença de granulação fina é importante para se obter uma resistência mecânica em temperaturas mais baixas, pois facilita a sinterização.

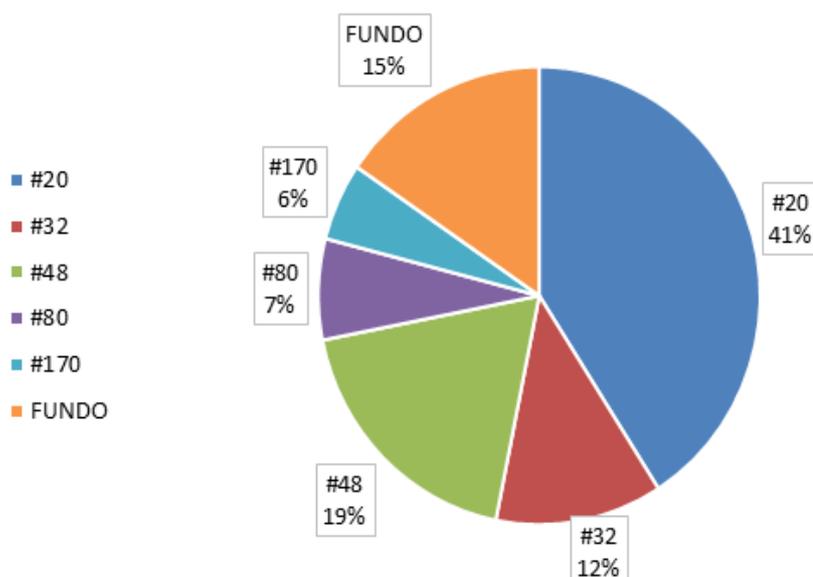
A AL-1 possui uma distribuição granulométrica mais homogênea o que é uma vantagem em relação à aplicação da mesma. Portanto, a AL-2 necessita de maior cuidado na preparação, manuseio e aplicação para impedir a segregação da massa.

A distribuição granulométrica da massa Mag-1 é bastante similar a da massa AL-2.

Distribuição granulométrica da AL-1 (Empresa A)

Peneira	Massa(g)	(%)
#20 (diâmetro >0,85 mm)	201	40,63
#32 ( diâmetro >0,5 mm)	60	12,15
#48 ( diâmetro >0,3 mm)	92	18,70
#80 ( diâmetro >0,18 mm)	35	7,13
#170 ( diâmetro >0,09 mm)	27	5,62
FUNDO (diâmetro médio = 0,019 mm)	76	15,75
SOMA PENEIRAS	491	100,00

Diâmetro médio	0,0954 mm
----------------	-----------

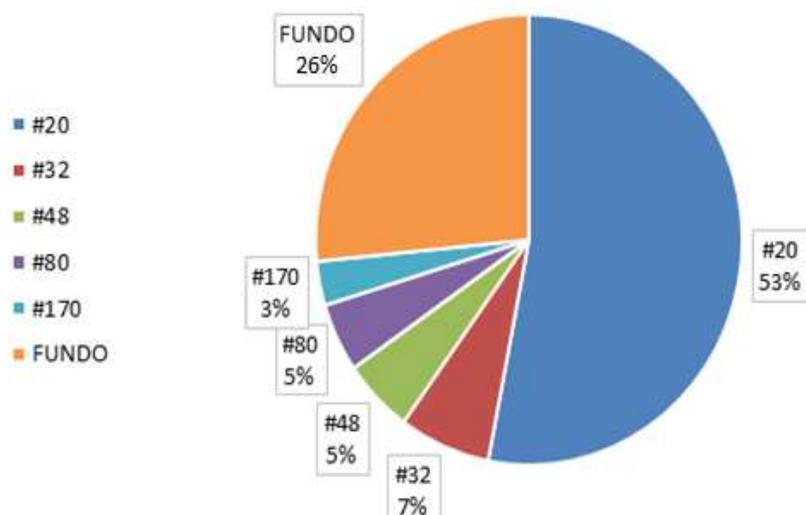


**Figura 30:** Distribuição e diagrama de análise granulométrica da AL-1 (Empresa A).

Distribuição granulométrica da AL-2 (Empresa B)

Peneira	Massa(g)	(%)
#20 (diâmetro >0,85 mm)	268	53,07%
#32 ( diâmetro >0,5 mm)	35	6,93%
#48 ( diâmetro >0,3 mm)	27	5,35%
#80 ( diâmetro >0,18 mm)	25	4,95%
#170 ( diâmetro >0,09 mm)	16	3,17%
FUNDO (diâmetro médio = 0,015 mm)	129	26,53%
SOMA PENEIRAS	500	100%

Diâmetro médio	0,0499 mm
----------------	-----------

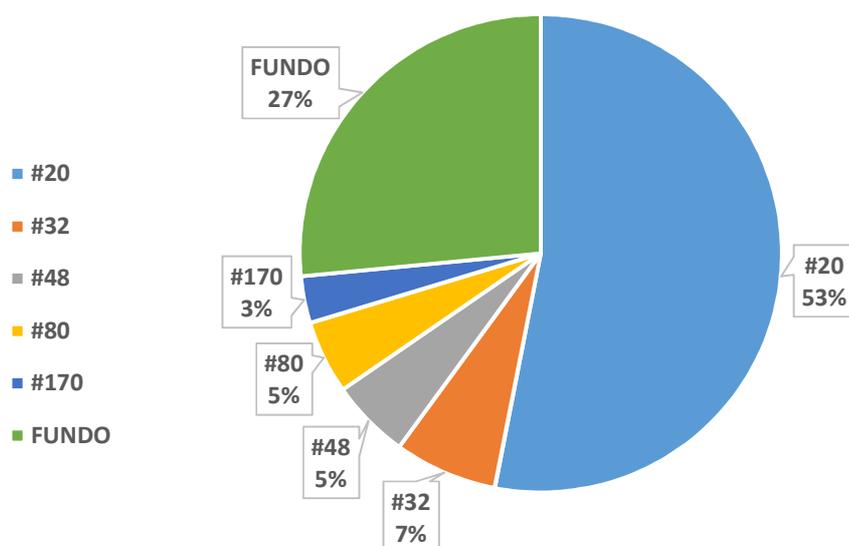


**Figura 31:** Distribuição e diagrama de análise granulométrica da AL-2 (EMPRESA B).

Distribuição granulométrica da MAG-1 (Empresa A).

Peneira	Massa(g)	(%)
#20 (diâmetro >0,85 mm)	147	49
#32 ( diâmetro >0,5 mm)	28	9
#48 ( diâmetro >0,3 mm)	13	4
#80 ( diâmetro >0,18 mm)	13	4
#170 ( diâmetro >0,09 mm)	7	2
FUNDO (diâmetro médio = 0,028 mm)	90	30
SOMA PENEIRAS	297	100

Diâmetro médio	0,0817 mm
----------------	-----------



**Figura 32:** Distribuição e diagrama de análise granulométrica da MAG-1 (Empresa A).

## 5.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados mostrados na Tabela 3 indicam que os corpos de prova (com 5 cm de diâmetro) (ilustrados na Figura 32) de AL-2 e de AL-1 apresentam uma resistência mecânica significativa quando preparados a temperatura ambiente.

Após a queima a 1400°C a resistência mecânica depende da ligação cerâmica, bem como da presença de poros e defeitos estruturais. A AL-1 apresentou resistência maior, o que pode ser atribuído às diferenças na distribuição granulométrica das duas massas.

No entanto, o valor de resistência é considerado bom para ambas as massas. Salienta-se, no entanto, que a resistência após a queima a 1400°C depende também da forma de aquecimento (a taxa de aquecimento no forno de laboratório foi de 300°C/h), o qual pode causar danos ou desenvolver poros maiores, devido à rápida evaporação e saída de água.

Neste caso, a maior fração de finos pode ter sido uma desvantagem para a massa AL-2 (maiores defeitos gerados na saída de água). Em condições de operação, as taxas de aquecimento são ainda mais elevadas (já que a massa de reparo é vertida na panela quente ~900°C).

Salienta-se, no entanto, que em temperaturas superiores (~1600°C em contato com aço) a sinterização pode aumentar a densificação e, conseqüentemente, propiciar uma maior resistência das massas (na superfície).

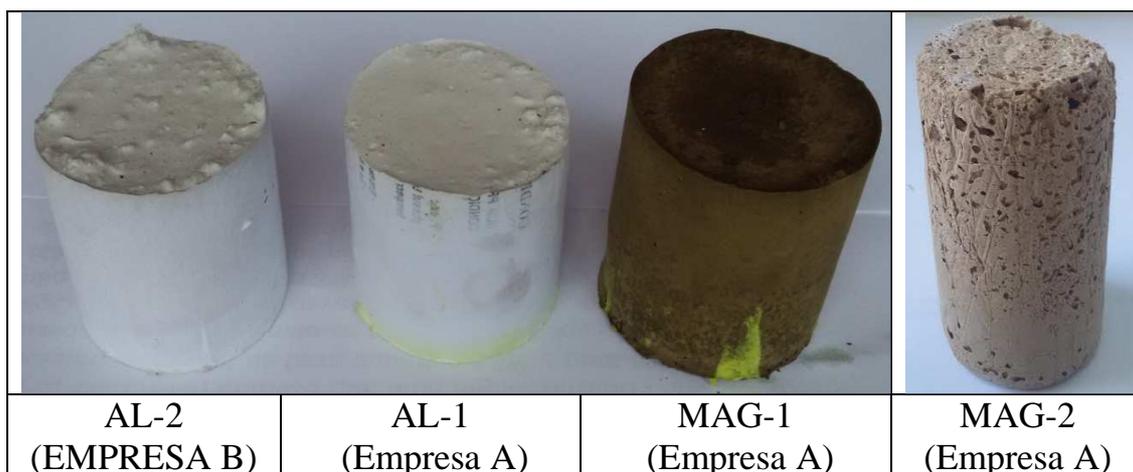
A MAG-1 apresentou resistência mecânica muito baixa à temperatura ambiente (neste caso não deve possuir cimento refratário) e teve resultado levemente inferior à AL-2 após queima a 1400°C. A massa MAG-2, devido a presença de resinas líquidas, dificulta a preparação de corpo de prova, gerando porosidade excessiva.

Esse fator pode favorecer valores de resistência a compressão inferiores aos reais.

**Tabela 3:** Médias dos resultados de resistência à compressão. AL-2, AL-1 e MAG-1.

Condições	Produto	Resistência a compressão ( N/mm <sup>2</sup> )	Desvio Padrão
1400 °C	AL-1	22,34	7,70
	AL-2	10,28	4,58
	Mag-1	8,84	0,46
	Mag-2	13,75	1,70
Temperatura ambiente	AL-2	15,52	4,42
	AL-1	21,82	3,91
	Mag-1	1,06	0,56

Obs: valores médios de 3 corpos de provas ou mais.



**Figura 33:** Corpos de prova para ensaio de compressão.

## 5.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA, POROSIDADE E DENSIDADE

A Tabela 4 mostra que as massas preparadas à temperatura ambiente apresentam menor absorção de água e menor porosidade aparente. Portanto, a queima das peças úmidas até 1400°C, propiciou uma maior porosidade aberta. Isto provavelmente explica também os resultados de resistência mecânica apresentados anteriormente (Tabela 3).

A AL-2 é a massa que apresentou maior porosidade (a AL-2 perdeu ~33% de resistência mecânica em relação a temperatura ambiente), o que pode ser consequência das diferenças na distribuição granulométrica entre as massas, como dito, a fração fina pode dificultar a saída de água, resultando em um menor empacotamento entre partículas.

Alguns corpos de prova de MAG-1 preparada à temperatura ambiente se desintegraram durante a análise, razão de não ser apresentados valores a temperatura ambiente (Tabela 4). No teste após queima a 1400°C ela apresentou valores de porosidade semelhante às outras massas.

A massa MAG-2 apresentou valores de absorção de água semelhante a massa AL-2 e foi a massa que apresentou menor porosidade aparente. Sua densidade também se mostrou bastante inferior as outras massas.

**Tabela 4:** Resultados obtidos para absorção de água, porosidade aparente e densidade das diferentes massas AL-1, AL-2, Mag-1, Mag-2 preparadas a temperatura ambiente e após queima a 1400°C.

Análise	Amostras			
	Temperatura ambiente		Queimadas a 1400°C	
Absorção de água (%)	AL-1	6,02±0,32	AL-1	7,24± 0,40
	AL-2	7,38±0,85	AL-2	8,32± 0,54
	MAG-1	-	MAG-1	7,31 ± 0,85
	Mag-2	-	Mag-2	8,76 ± 0,97
Porosidade Aparente (%)	Temperatura ambiente		Queimadas a 1400°C	
	AL-1	17±0,81	AL-1	19,9± 0,94
	AL-2	19,92±1,76	AL-2	22,2± 0,10
	MAG-1	-	MAG-1	15,29 ± 1,52
	Mag-2	-	Mag-2	18,35± 1,65
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura ambiente		Queimadas a 1400°C	
	AL-1	2,82±0,02	AL-1	2,75±0,03
	AL-2	2,7±0,076	AL-2	2,67± 0,04
	Mag-1	-	Mag-1	1,75 ± 0,12
	Mag-2	-	Mag-2	2,10 ± 0,09

## 5.8 ÍNDICE DE HAUSNER

Os índices de Hausner obtidos (Tabela 5) indicam que a fluidez das partículas de AL-2 é menor do que a das outras massas.

O que pode ser uma pequena desvantagem na aplicação por deposição direta, ao se verter as massas diretamente nas sedes. Uma vez que o teste é realizado com as partículas não umidificadas, não foi possível realizá-lo para a massa MAG-2.

**Tabela 5:** O índice de Hausner obtido para as massas de reparo materiais de reparo AL-1 (Empresa A), AL-2 (EMPRESA B), MAG-1 (Empresa A).

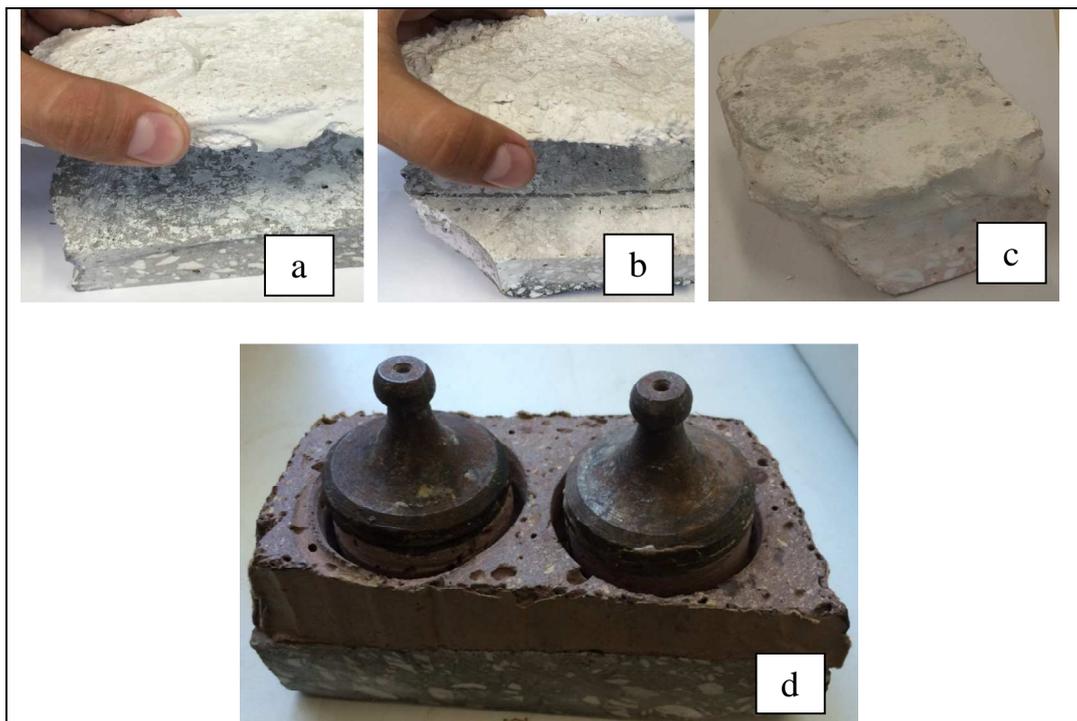
<b>Tipo</b>	<b>IH</b>
AL-1	1,118
AL-2	1,290
MAG-1	1,118

## 5.9 ADESIVIDADE

Um dos principais problemas do processo de uso das massas de reparo sobre as sedes de panela é a fixação ineficiente da massa sobre o substrato ocasionando a queda completa do reparo entre uma corrida e outra, isso motivou o interesse em avaliar a adesividade das massas com o substrato.

A massa AL-1 tanto preparada a temperatura ambiente (Figura 37(a)) quanto a preparada a 1400°C (Figura 37 (b)) perdeu aderência do substrato ainda durante o manuseio.

O mesmo aconteceu com a massa AL-2 (Figura 37(c)). A amostra de aderência da massa MAG-2 foi preparada a 120°C, uma vez que não endurece a temperatura ambiente.



**Figura 34:** Diferentes massas de reparo sobre a sede. (a)AL-2 (EMPRESA B) a temperatura ambiente, (b) AL-1 (Empresa A) a temperatura ambiente, (c) AL-1 (Empresa A) a 1400°C, (d) Mag-2 (Empresa A) a 120°C já preparado para o ensaio de adesividade.

Além de resistir ao manuseio ela também apresentou alta resistência no teste de Aderência à tração, 2,83 MPa, valor que se comparado ao das massas de revestimento usadas na indústria da construção civil, é bastante alto, os valores de resistência das argamassas de revestimentos da construção civil variam de 0,11 a 0,25MPa. (BARBOSA, 2008)

A Figura 38 mostra a massa Mag-2 fraturada após ensaio de aderência à tração e demonstra como a fratura ocorreu no corpo da massa e não na interface entre a massa e o substrato, indicando que a resistência na interface é superior à da própria massa.



**Figura 35:** Massa Mag-2 fraturada após ensaio de adesividade.

**Tabela 6:** Resultado do teste de resistência a tração da aderência (MPa)

Amostra	Resistência a tração (MPa)
AL-1 (Empresa A) a temperatura ambiente	-
AL-1 (Empresa A) a 1400°C	-
AL-2 a temperatura ambiente	-
MAG-2 (Empresa A) a 120°C	2,85MPa

Ao se realizar o teste com a massa sinterizada, não foi possível obtermos nenhum resultado, pois para realizarmos o ensaio a massa deve estar a temperatura ambiente e quando esfriamos as amostras, devido ao fato de serem materiais diferentes (massa e substrato) e dilatarem de forma diferente, a massa naturalmente desprende do substrato.

## 5.10 TESTES NA INDÚSTRIA

As massas AL-1 e AL-2 são de uso comum na usina, de modo que os testes realizados nesse trabalho abrangem principalmente as massas AL-1 e MAG-2. Uma vez que a MAG-1 não apresentou resultados satisfatórios em laboratório, que justificassem seu uso na planta, optou-se por avaliar a massa aluminosa que apresentou os melhores resultados em laboratório, ou seja, a massa AL-1.

Por conseguinte, essa avaliação foi realizada, comparando-se o desempenho das massas AL-1 e Mag-2 no período de 31 de março de 2016 até 14 de abril de 2016.

Com o objetivo de tornar a comparação o mais coerente possível, considerou-se apenas trocas de plugues em sedes que já haviam sofrido desgaste previamente.

Não foram considerados os plugues em final de campanha de panela (pois o critério de troca normalmente independe da qualidade da sede e sim da panela, que já está com um número muito elevado de corridas.).

Em relação aos testes, foi orientado aos operadores que os plugues deveriam ser trocados no momento em que o reparo fosse consumido.

Nas tabela 7 e Tabela 8 pode-se ver os dados obtidos nas trocas.

**Tabela 7:** Resultados obtidos com a massa AL-1.

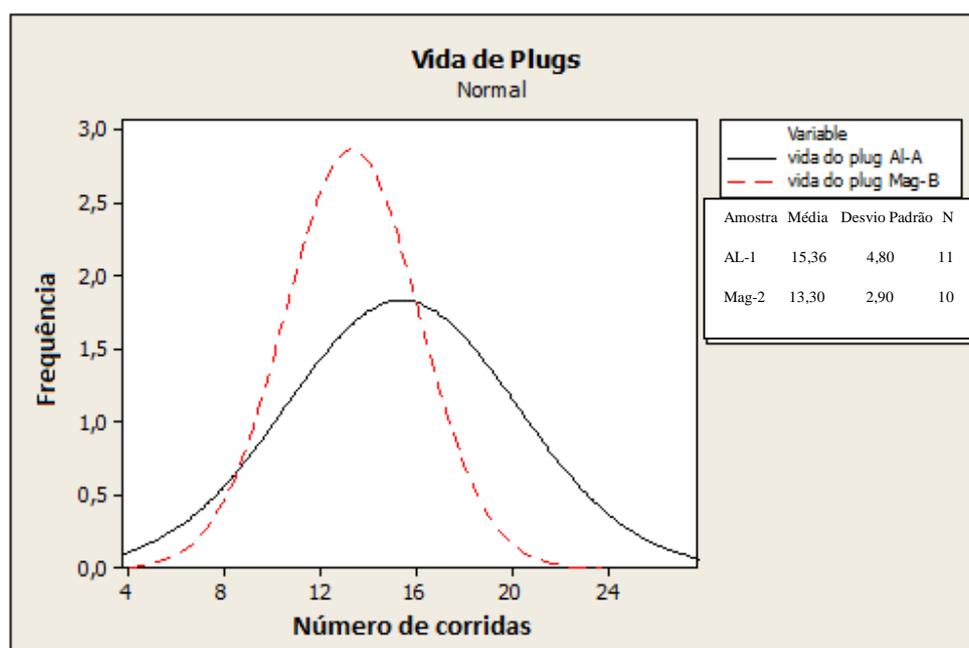
Número da Panela	Qtd de massa (kg)	Data	Residual	Vida do Plugue (corridas)	Desgaste da Sede (mm)
4	50	31-mar	260	18	20
13	60	3-abr	270	25	30
6	75	5-abr	280	16	20
1	75	6-abr	280	9	30
5	50	10-abr	280	12	10
6	60	10-abr	230	11	10
5	50	11-abr	270	11	30
6	50	11-abr	220	19	20
1	75	11-abr	210	13	10
11	75	11-abr	210	20	10
13	75	12-abr	210	15	10

**Tabela 8:** Resultados obtidos com a massa Mag-2.

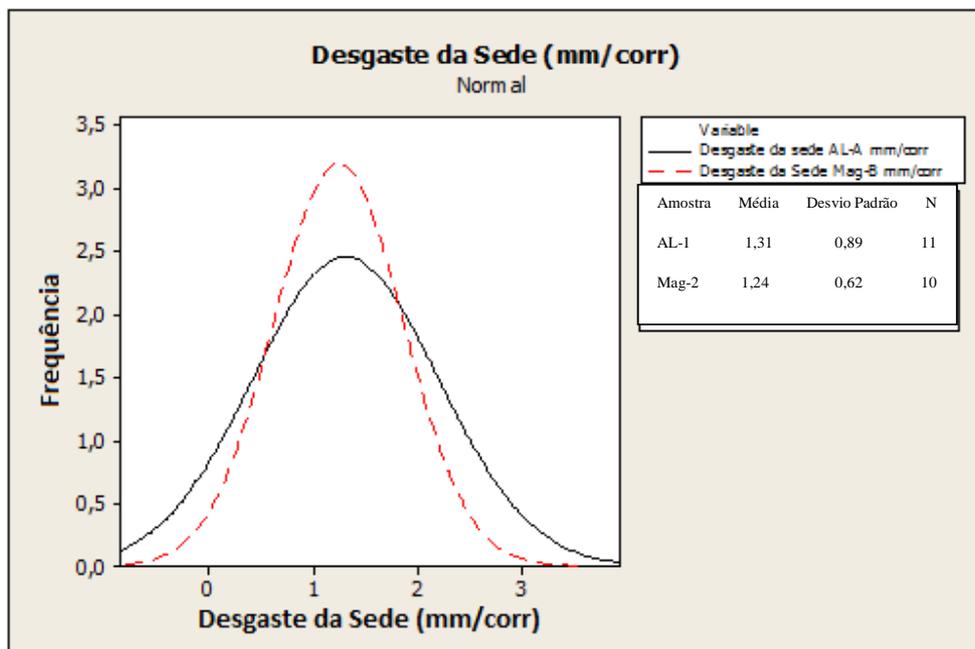
Número da Panela	Qtd de massa (kg)	Data	Residual	Vida do Plugue (corridas)	Desgaste da Sede (mm)
11	40	6-abr	240	13	10
4	40	6-abr	240	15	20
1	50	6-abr	250	15	10
6	40	7-abr	260	12	10
13	50	8-abr	240	13	20
11	50	8-abr	230	20	20
6	50	9-abr	250	12	20
5	40	9-abr	290	11	10
13	40	9-abr	220	11	10
1	40	9-abr	240	11	30

Usando o software MINITAB, foi possível plotar um histograma da vida de plugues e do desgaste médio de sede a cada troca de plugue.

Conforme a Figura 39 e o Figura 40 demonstram, a média de vida de plugue foi mais constante, com menor desvio padrão, para a Mag-2, entretanto a média de vida de plugue foi maior para a massa AL-1. Já o desgaste médio de ambas as massas é semelhante.



**Figura 36:** Histograma da média da vida dos plugues durante a realização do teste.



**Figura 37:** Histograma do desgaste médio da sede por reparo realizado.

Pode-se perceber que por vir com a composição pré-definida de fábrica, a massa Mag-2 apresentou maior uniformidade de resultados da massa AL-1, entretanto, a média de duração do reparo foi maior para a massa AL-1.

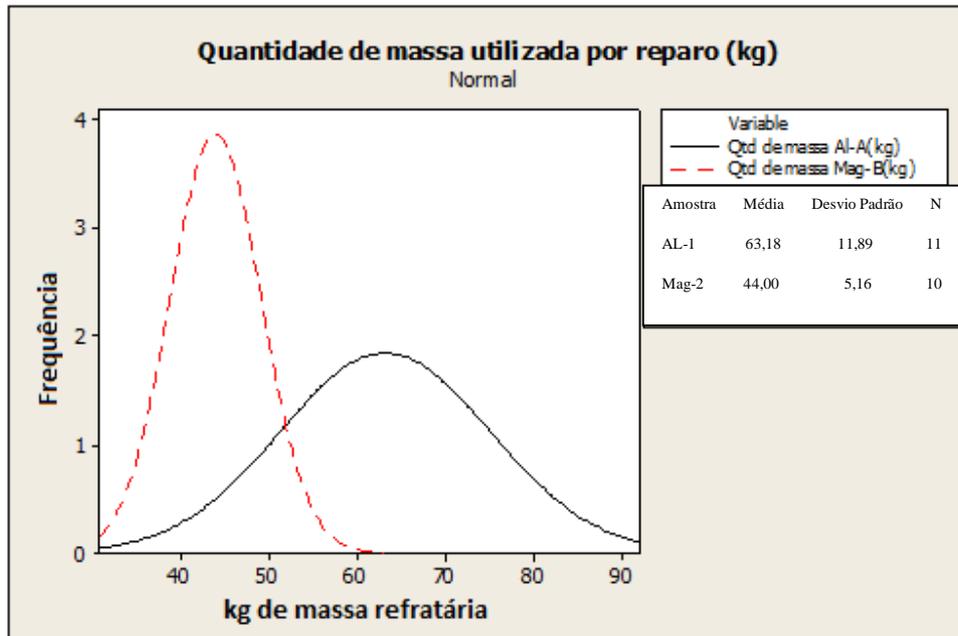
Outro fator importante de se levar em consideração é a quantidade de massa utilizada em cada reparo, pode-se perceber na tabela 9 que a média em kg de massa utilizada para AL-1 e Mag-2, respectivamente são 63,18kg e 44 kg.

O desvio padrão da massa Mag-2 (5,16 kg) também é muito menor se comparado a massa AL-1(11,89 kg).

Essa diferença significativa deve-se principalmente ao grande desperdício de massa oriundo das perdas do processo descrito no item 3.2.5. A Figura 41 mostra que o consumo de massa por corrida, para o reparo de massa, é consideravelmente maior para massa Al A.

**Tabela 9:** Comparação do desempenho entre as massas Al A e Mag B.

	Qtd de massa (kg)	Vida do Plugue (corridas)	Desgaste da Sede (mm/corr)	Qde massa/corrída (kg)
AL-1	63,18 ± 11,89	15,36 ± 4,81	1,31 ± 0,89	4,50 ± 1,23
Mag-2	44,00 ± 5,16	13,30 ± 2,79	1,33 ± 0,62	3,31 ± 0,40



**Figura 38:** Histograma da quantidade média de massa utilizada por reparo.

A partir desses resultados, pode-se calcular o consumo mensal de massas de reparo e plugues, para se calcular qual massa apresenta o custo mais favorável.

Com base nos valores médios obtidos no teste, pode-se estimar o valor total gasto ao longo de uma vida máxima de panela, ou seja, 280 corridas. Considerando esse número de corridas, na tabela 10 pode-se ver que:

**Tabela 10:** Valores simulados de consumo para uma panela com 280 corridas.

Tipo	Plugues	Massa (kg)
AL-1	18	1152
Mag-2	21	926
% De impacto no custo	Aumento de 13,41%	Redução de 55%
% Ganho total	10,79% de redução no custo final	

Pode-se observar que a massa Mag-2 necessitará de 3 plugues a mais que a massa AL-1, entretanto, o consumo de massa AL-1 seria em torno de 14,5% superior ao consumo de massa Mag-2.

Levando em consideração o custo dos plugues e das massas, tem-se que a utilização da massa Mag-2 acarretaria em um ganho de 10,8% no custo dessa atividade.

## 6. CONCLUSÕES

As massas de reparo de sede AL-1 e AL-2 apresentaram propriedades similares, como demonstraram as análises de caracterização de composição química e mineralógica. Salienta-se que a pureza das massas, conforme a análise de fluorescência de raios X e investigação microestrutural, é aproximadamente a mesma. Elas, no entanto, diferem quanto à distribuição de tamanhos de partículas.

A AL-2 apresenta uma maior quantidade de agregados de maior tamanho, o que potencialmente pode conferir maior resistência à corrosão e ao desgaste. No entanto, ela possui maior quantidade de partículas finas e isto pode afetar as propriedades de três maneiras: maior dificuldade de secar o concreto, maior dificuldade de saída da água em taxas de aquecimento elevada (este é o caso da aplicação dessa massa) e promover a sinterização em menores temperaturas. Ela possui também fibras, as quais podem favorecer a secagem e compensar a quantidade de finos. Por outro lado, a AL-1 e Mag-1 apresentam uma distribuição de tamanhos de partículas mais homogênea e maior fluidez da massa. Portanto, a AL-2 necessita um maior cuidado no manuseio e aplicação da massa para se evitar as segregações e, certamente, maior cuidado na secagem.

As massas AL-1 e AL-2 apresentaram resistência à compressão elevada a temperatura ambiente ( $>15\text{MPa}$ ), devido a pega da fase cimentícia.

A absorção de água e a porosidade após a queima a  $1400^{\circ}\text{C}$  foram maiores que na temperatura ambiente. Isto prova que a rápida saída de água aumenta a porosidade e a sinterização ( $1400^{\circ}\text{C}$ ) não compensou este aumento de porosidade aberta.

A massa AL-1 apresentou maior resistência mecânica ( $\sim 23\text{MPa}$ ) e menor porosidade (20%) em relação à AL-2 ( $\sim 10\text{MPa}$  e 22%, respectivamente), após a queima em  $1400^{\circ}\text{C}$ . A massa Mag-2 apresentou o segundo melhor resultado em resistência mecânica ( $\sim 13,75\text{MPa}$ ).

A massa Mag-1 apresentou menor valor de resistência mecânica a temperatura ambiente e resistência semelhante a da AL-2 ( $9,5\text{MPa}$ ) após queima a  $1400^{\circ}\text{C}$ .

A adesão é uma propriedade importante para o processo, pois, sabe-se que quando a massa de reparo se solta da sede por falta de aderência o problema bastante crítico, pois se perde rapidamente todo o revestimento.

Os testes realizados indicam que a AL-1 tem melhores propriedades como massa estrutural, no entanto, assim como a AL-2 ela nem sempre adere bem ao substrato. Uma vez que essa propriedade é extremamente importante ao processo, essas massas não são adequadas à metodologia de aplicação, principalmente pela rápida saída de água e geração de porosidade, podendo gerar eventos de falha em serviço.

As massas Al-1, Al-2 e Mag-1 dependem muito da formulação e preparação no chão de fábrica (mistura e quantidade de água adicionada in loco). Já Mag-2, apesar de ter propriedades estruturais inferiores a Al-1 e semelhantes às outras massas, destaca-se pela boa adesão no substrato (sede), facilidade de instalação, devido a sua elevada fluidez, e apresenta a grande vantagem de já vir ‘pronta para uso’.

O melhor resultado quanto à resistência a tração da aderência foi o da Mag-2 preparada a 140°C, a qual resistiu a 2,85 MPa.

Ao se considerar os custos do processo, conclui-se que a massa de reparo Mag-2 possui significativa vantagem em relação a Al-1, uma vez que possui menor consumo em (kg) de massa por corrida e menor custo que as demais massas analisadas.

Para a demanda necessária, conforme demonstrado no teste industrial, ter propriedades muito superiores, como as aluminosas, não representa necessariamente a mesma superioridade na prática industrial, nesse caso, o fator de maior importância foi a facilidade de uso da massa magnésiana aliada a maior uniformidade dos resultados.

## **7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Analisar as fases formadas na interface entre massa de reparo e substrato (sede).
- Avaliar a possível formação/ adesão do "coating" (camada de silicato dicálcico, encontrada no revestimento dolomítico) sobre a massa de reparo magnesiana.
- Verificar junto aos fornecedores de materiais refratários a possibilidade de utilizar massas aluminosas de escoamento livre com resina de pega à quente.

## 8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6220: Materiais refratários densos conformados – Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida (1997).

ASTM C133-97 (2003), Standard test methods for cold crushing strength and modulus of rupture of refractories, ASTM – American Society for Testing and Materials, USA, Book of Standards Volume: 15.01.

ALMEIDA, C. F. Situações de emergência e operações críticas no lingotamento contínuo, disponível em: <http://pt.slideshare.net/blefatrix/preveno-de-acidente-lingotamento-contnuo> Acesso em 25 de maio 2016

ARAUJO, L. A. Manual de siderurgia vol.1, São Paulo, Arte e Ciência, 1997.

BARBOSA, H. Ensaio de aderência das argamassas de revestimento, Universidade federal de minas gerais, 2008.

CARNIGLIA, S. C. Handbook of industrial refractories technology: principles, types, properties and applications, 1992.

CASSÉTE, W. Q. Refratários para uso em forno panela. Seminário ABM - Refratários para siderurgia, Belo Horizonte, p. 135 - 152, mar. 2000

CARVALHO NETO, J.C, HOFFMAN, A., FIGUEIREDO JUNIOR, A.O. Considerações sobre seleção de refratários para forno panela. Seminário ABM Aciaria Refratários e Fornos Elétricos, Rio de Janeiro, p. 429-448, dezembro de 1989.

Centro brasileiro da construção em aço, A evolução da construção em aço no Brasil, disponível em: <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticias-detalhes.php?cod=7074> Acesso em 25 de maio 2016.

COUTINHO, E. S. Projetos de revestimentos refratários – fundamentos. Seminário ABM Refratários para siderurgia, Belo Horizonte, p 97-120, mar. 2000.

FALCONI, V. C. Tecnologia de fabricação do aço líquido, UFMG, 1980.

FRUEHAM, R. J. Ladle Metallurgy Principles and Practices. ISS, 1985.

INSTITUTO AÇO BRASIL, Contextualização Econômica. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/1-contextualizacao-economica>. Acesso em: 10 mai 2016.

LANDY, R. A, Magnesia Refractories, Em: Refractories Handbook, edited by SCHATCHT, C. A, Marcel Dekker INC, New York, (2004) 109.

LOBATO, E. Relatório Técnico 71 - Refratários. Ministério de minas e energia, 2009.

MAGNESITA. S.A. Informações Básicas - Refratários para panela de aciaria, 2016.

MAXWELL, PUC-RIO, Produção do Aço, disponível em: [http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18624/18624\\_3.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18624/18624_3.PDF). Acesso em 25 mai de 2016.

LOURÃO, M. B et al. Introdução a siderurgia. Associação brasileira de metalurgia e materiais, 2007.

OLIVEIRA, S. P., Brant, P.O.R.C. Refratários para os processos de refino secundário. Seminário ABM Refino secundário dos aços, Belo Horizonte, p. 451-490, outubro de 2005.

PERET C. M. et al. Reforço mecânico por fibras poliméricas e seus efeitos na secagem de concretos refratários, 2003.

PRETORIUS, EB, CARLISLE RC, Foamy slag fundamentals and their practical application to electric furnace steelmaking, In Electric Furnace Conference Proceedings, 1998.

RIZZO, E. M. S. Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1st edition, 2006.

SANTOS, C. Fluxo do processo da aciaria. UNIP - Faculdade Paulista, 2013.

SCHACHT, C. A. Refractories Handbook, Marcel Dekker INC, New York, 2004.

SCHEID, A. Curso básico de aços - Fabricação, transformação e usos. Curitiba, 2010.

SILVA, J. N. S. Siderurgia - IFPA: Santa Maria : UFSM, 2011.

SONAGLIO, R. D. Avaliação do potencial de reutilização de resíduos refratários em massas refratárias, 2011.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Sustainable Steel: at the core of the green economy, 2012.