

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GUILHERME SOUZA GALLO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS DA PRODUÇÃO
INDUSTRIAL DE TIJOLOS REFRAATÓRIOS ALUMINOSOS E SÍLICO-
ALUMINOSOS**

BELO HORIZONTE

2015

GUILHERME SOUZA GALLO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS DA PRODUÇÃO
INDUSTRIAL DE TIJOLOS REFRAATÓRIOS ALUMINOSOS E SÍLICO-
ALUMINOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Paulo Renato Perdigão Paiva

BELO HORIZONTE

2015

GUILHERME SOUZA GALLO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA REUTILIZAÇÃO DE REJEITOS DA PRODUÇÃO
INDUSTRIAL DE TIJOLOS REFRAATÓRIOS ALUMINOSOS E SÍLICO-
ALUMINOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em 09/12/2015

Prof. Paulo Renato Perdigão Paiva - Orientador

Prof. Marcello Rosa Dumont

Prof. João Bosco dos Santos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Agradeço a minha família que soube compreender minha ausência em vários momentos, além de me apoiar nos momentos difíceis e me motivar constantemente ao longo dessa jornada.

Aos amigos e colegas que estiveram ao meu lado tornando esta jornada mais agradável.

Ao Diego Santos Oliveira, que teve papel fundamental no meu crescimento acadêmico e profissional. Muito obrigado pelos ensinamentos ao longo do curso, pela indicação na minha primeira iniciação científica, por me ajudar na preparação do trabalho que me rendeu o meu primeiro estágio e atual emprego, do imenso suporte na realização deste trabalho, e claro, pela amizade.

Expresso também minha gratidão pelo suporte e atenção do amigo, professor e orientador Paulo Renato Perdigão de Paiva, que teve grande paciência ao me orientar e pelo incentivo durante toda a realização do TCC.

A todos os colaboradores da Magnesita que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, em especial ao Alysson Adriano da Cunha Magalhães que possibilitou a realização deste trabalho com sua dedicação e prontidão em me passar vários ensinamentos, técnicos e não técnicos.

Por fim, aos demais professores do curso de Engenharia de Materiais do CEFET-MG que contribuíram com a minha formação.

RESUMO

Os rejeitos gerados a partir do processo de queima não são facilmente reutilizados, pois nesta etapa do processo o material conformado já possui uma resistência mecânica considerável. Atualmente na Magnesita Refratários S.A. o reprocessamento de rejeitos pós-tratamento térmico (QPTT) é realizado através da dosagem controlada como matéria-prima em apenas algumas marcas de tijolos comerciais. Essa dosagem não é suficiente para reaproveitar todos os QPTTs gerados. Sabe-se que até a realização do presente trabalho o índice de cobertura de estoque dos referidos rejeitos era de mais de um ano. Diante disso, este trabalho busca uma melhor compreensão dos materiais refratários (em especial os aluminosos e sílico-aluminosos), uma expansão do conhecimento do processo de fabricação de tijolos refratários utilizado na Magnesita Refratários S.A., especificamente na FAPE (Fabrica de Aluminosos e Produtos Aluminosos) e o desenvolvimento de uma rota alternativa de reprocessamento dos rejeitos gerados a partir dessas quebras pós-tratamento térmico, oriundas do processo de fabricação dos tijolos refratários aluminosos e sílico-aluminosos. Para que possa ser proposta uma nova rota de reutilização dos rejeitos reprocessados foram realizadas a avaliação das especificações das principais matérias-primas utilizadas e análises físicas e químicas de 49 marcas de tijolos, visando aumentar a possibilidade de consumo e conseqüente redução do índice de cobertura de estoque (ICE) dos rejeitos. Por simulação, foi possível o estabelecimento de uma nova faixa de especificação para as matérias-primas, cuja a viabilidade é relevante. Conforme os resultados analisados e apresentados foi possível propor uma nova rota de reutilização desses rejeitos, permitindo um aumento significativo do consumo dos mesmos através da dosagem de 1% nas matérias-primas consideradas. A nova rota proposta poderia ter aumentado o consumo de quebra pós-tratamento térmico em 150% no período analisado.

Palavras-chave: Refratários; Matéria-prima; Rejeito; Reprocessamento.

ABSTRACT

Scraps generated from the firing process are not easily reused because at this stage of the process the conformed material already has considerable mechanical resistance. Currently in Magnesita Refratários S.A the reprocess of post heat-treatment breakage (PHTB) it's accomplished through controlled dosing as raw material in only a few brands of commercial bricks. This dosage is not enough to reuse all the PHTB generated. It is known that until the attainment of this work, stock coverage ratio (SCR) of related rejected was over than a year. Before that, this work seeks a better understanding of refractory materials (in special aluminous and silico-aluminous), an expansion of the knowledge of Magnesita's aluminous and silico-aluminous bricks manufacturing process, specifically in AFEP (Aluminous Factory and Especial Products) and the development of an alternative route for reprocessing of wastage generated by PHTB from the manufacturing process of aluminous and silico-aluminous refractory bricks. In order to propose a new route of reusing of wastage as reprocessed, specifications' evaluations of the main raw materials used were conducted and physical and chemical analysis of 49 brick brands, aiming increase the possibility of consumption and consequent reduction of stock coverage ratio (SCR). By simulation, it was possible to establish a new specification range for the raw materials, which the viability is relevant. According to the results analyzed and presented it was possible to propose a new route of reuse of the wastage, allowing a significant increase in their consumption by 1% in the analyzed raw materials. The new proposed route could have increased the consumption of PHTB in 150% in the analyzed period.

Key- Words: Refractories; Raw Material; Wastage; Reprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de cominuição	13
Figura 2 – Cálculo de densificação de tijolos - P/V Crú	17
Figura 3 – Representação do defeito tipo laminação	18
Figura 4 - Representação esquemática da formação de trincas	19
Figura 5 - Processo padronizado utilizado na fabricação de refratários	22
Figura 6 - Fluxograma do processo produtivo em estudo com destaque para a obtenção do material em estudo e análises que serão realizadas no mesmo	26
Figura 7 - Fluxograma do processo produtivo em estudo com a rota existente de consumo do reprocessado e da rota alternativa proposta pelo estudo	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estágios de Britagem	11
Tabela 2 – Especificações das matérias-primas	27
Tabela 3 – Identificação das variáveis utilizadas na determinação dos parâmetros das análises físicas	28
Tabela 4 – Resultado das análises químicas e físicas	31
Tabela 5 – Resultado das análises químicas e físicas	32
Tabela 6 – Resultados da simulação da dosagem das marcas de tijolos nas matérias-primas	24
Tabela 7 – Especificações atuais e novas especificações propostas	35
Tabela 8 – Comparativo das médias das faixas atuais e propostas de especificação das matérias-primas	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVAS	3
3 OBJETIVOS	4
3.1 Objetivo Geral	4
3.2 Objetivo Específico	4
4 REVISÃO DE BIBLIOGRÁFICA	5
4.1 Materiais Refratários	5
4.2 Matérias-Primas para Refratários	6
<i>4.2.1 Matérias-primas para refratários sílico-aluminosos</i>	<i>7</i>
<i>4.2.2 Propriedades das matérias-primas para refratários sílico-aluminosos</i>	<i>8</i>
4.3. Processo de Fabricação de Tijolos Refratários	9
<i>4.3.1 Cominuição: britagem e moagem</i>	<i>10</i>
<i>4.3.2 Mistura: Homogeneização de sistemas particulados</i>	<i>14</i>
<i>4.3.3 Prensagem</i>	<i>16</i>
<i>4.3.4 Secagem</i>	<i>19</i>
<i>4.3.5 Sinterização</i>	<i>20</i>
4.4 Processo de Fabricação de Tijolos Refratários Utilizado na Magnesita	21
4.5 Reciclagem de Refratários	23
4.6 Métodos Utilizados para Análise Química	25
<i>4.6.1 Espectrometria de fluorescência de raios X</i>	<i>25</i>
<i>4.6.2 Espectrometria de absorção atômica</i>	<i>25</i>
5 METODOLOGIA	26
5.1 Materiais	26
5.2 Análise Física	27
5.3 Análise Química	29
5.4 Simulação da Dosagem de 1%	29
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
7 CONCLUSÃO	38
8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	39

1. INTRODUÇÃO

Materiais refratários são empregados em aplicações que exigem resistência ao ataque químico e à tensões termo-mecânicas (BERNARDES,2005). Dentre as classes de materiais refratários, os tijolos refratários têm destaque em diversos setores da indústria. Isto se deve principalmente pela sua facilidade de aplicação e manutenção, possibilidade de obtenção de revestimentos com, menores custos de fabricação (BANERJEE, 1998).

A não conformidade de um tijolo refratário durante o processo de fabricação pode ocorrer por diversos motivos. Entre estas não conformidades podem ser consideradas a não conformidade de uma matéria-prima utilizada, como desvios granulométricos e de composição química e variações de propriedades físicas, além de falhas ocorridas nos processos de conformação dos tijolos e tratamento térmico dos mesmos (BUDNIKOV, 1964; BERNARDES, 2005).

Os rejeitos advindos das quebras que antecedem o tratamento térmico, são chamados de quebras cruas (QC) e podem ser reaproveitados facilmente, já que antes do tratamento a massa passa apenas pelos processos de conformação mecânica. Sendo assim, por mais que tenha ocorrido mudanças conformacionais, não ocorre nenhuma ligação química, e as propriedades das peças cruas e da massas refratárias a serem conformada são as mesmas.

Os rejeitos gerados a partir do processo de queima, quebras que ocorrem durante e após o tratamento térmico (QPTT) não são facilmente reutilizados. Nesta etapa do processo, o material conformado já possui uma resistência mecânica considerável e também já passou por difusões de grãos e outras transformações que ocorrem no tratamento térmico. Uma vez que após o tratamento térmico as massas já possuem as mesmas propriedades físicas e químicas do seu produto final, a utilização das QPTTs como matéria-prima se torna mais difícil.

No processo em análise, as QPTTs são separadas de acordo com a sua composição química e então passam por um processo de beneficiamento para que possam ser utilizadas como matéria-prima reprocessada. Os reprocessados são utilizados como matérias-primas adicionais de algumas marcas específicas, com uma dosagem controlada garantindo sempre que a sua adição não interfira nas propriedades finais do produto fabricado.

A otimização da reutilização das quebras de produção como matérias-primas reprocessadas é de fundamental importância, uma vez que visa aumentar o volume de rejeito

consumido, minimizando assim os impactos ambientais causados pelo seu descarte, custos de armazenamento, além de substituir o custo de uma matéria-prima nova por uma que já teve seu custo computado. Entretanto, para otimizar um processo de reprocessamento é necessário avaliar os fatores viabilidade técnica e viabilidade econômica.

Dentro deste contexto, este trabalho busca avaliar o reaproveitamento dos rejeitos gerados pela quebra pós-tratamento térmico de tijolos refratários aluminosos e sílico aluminosos produzidos pela Magnesita Refratários S.A. Além disso, esse estudo busca definir uma possível rota alternativa de reaproveitamento desse rejeito, de modo a aumentar a possibilidade de consumo deste sem comprometer o produto final. Para isso serão feitas análises físicas e químicas de 49 marcas de tijolos fabricados a partir de 3 matérias-primas principais e também serão consideradas as especificações químicas e físicas já existentes para estas matérias-primas.

2. JUSTIFICATIVAS

Atualmente o reprocessamento de QPTTs é realizado através da dosagem controlada como matéria-prima em apenas algumas marcas de tijolos comerciais, referente ao processo produtivo em estudo da Magnesita Refratários S. A. Apenas essa dosagem não é suficiente para reaproveitar toda a QPTT gerada. Sabe-se que até a realização do presente trabalho o índice de cobertura de estoque (ICE) dos referidos rejeitos era de mais de um ano.

O estoque de rejeitos não é desejado para uma empresa devido ao seu custo de armazenamento, problemas de logística e até mesmo uma possível degradação do material exposto ao tempo, que pode comprometer sua qualidade. Além disso, conseguimos obter uma matéria-prima nobre a um custo baixo, uma vez que o custo deste material já foi computado no primeiro ciclo.

Dentro dessa realidade da empresa, este trabalho tem uma importância fundamental no que se refere à reutilização desses rejeitos em um número maior de marcas de tijolos comerciais, visando a redução do ICE e a otimização da utilização das QPTTs.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Desenvolver uma rota alternativa de reprocessamento dos rejeitos gerados pelas QPTTs oriundas do processo de fabricação dos tijolos refratários aluminosos e sílico-aluminosos.

3.2. Objetivos Específicos

- a) Verificar a viabilidade da reutilização dos rejeitos gerados pelo processo produtivo de tijolos refratários aluminosos e sílico-aluminosos na etapa de beneficiamento das matérias-primas baseado nos seguintes parâmetros:
 - Teor de sílica;
 - Teor de alumina;
 - Porosidade aparente;
 - Densidade aparente.
- b) Determinar uma nova especificação para as matérias-primas que possibilite uma dosagem ótima de todas as QPTT em análise em qualquer uma das mesmas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Materiais Refratários

Refratários são materiais naturais ou sintéticos, geralmente não metálicos, mas que podem conter componentes metálicos, capazes de suportar temperaturas elevadas e solicitações químicas, térmicas e mecânicas em condições específicas de emprego, sem acentuada deformação dimensional (SILVA,2006). São materiais constituídos por vários componentes, polifásicos, policristalinos, capazes de resistir a ambientes hostis sob solicitações diversas, tais como altas temperaturas, altas cargas mecânicas, oscilações de temperaturas, abrasão, erosão, corrosão, impacto e outros. (DUARTE, 2013; BANERJEE, 1998). São produtos destinado ao revestimento de equipamentos ou fornos industriais que trabalham a elevadas temperaturas (MATOS, 2009; BERNARDES, 2005; BUDNIKOV, 1964)

Os materiais refratários representam um dos mais importantes materiais cerâmicos de uso em engenharia, tanto pela importância econômica desses materiais como por sua destacada importância estratégica para todas as outras indústrias que utilizam temperaturas elevadas, especialmente a indústria metalúrgica (BANERJEE, 1998).

A performance dos produtos refratários depende de suas propriedades nas condições de sua utilização. De uma maneira geral, as propriedades desses produtos decorrem de sua composição química, mineralógica e de sua estrutura (número, tamanho, distribuição de tamanhos de poros e grãos). A estrutura, por sua vez, está intimamente dependente do método usado para transformar as matérias-primas em produtos, uma vez que a qualidade do processo de fabricação torna-se uma via para melhorar o tempo de vida do refratário em serviço (BERNARDES, 2005; BUDNIKOV, 1964). Um refratário não é igual ao outro, distingue-se quimicamente e fisicamente onde apresentam diferentes comportamentos (MATOS, 2009). Estas distinções podem ser simplificadas ao separamos os materiais refratários em diferentes grupos (DUARTE, 2013):

a) Quanto à forma:

- Refratários moldados: tijolos, peças especiais.

- Refratários monolíticos: argamassas, massas de socar, plásticos refratários, granuladosrefratários, concretos refratários, massas de projeção, massas de injeção, massas de cobertura, pinturas refratárias.

b) Quanto à composição química:

- Refratários básicos: cromita, cromo-magnesiano e espinelizados.
- Refratários não básicos: sílica, sílico-aluminosos e aluminosos.
- Refratários especiais: carbetos de silício, carbono, zircônia e zirconita.

Refratários aluminosos e sílico-aluminosos

Os produtos aluminosos e sílico–aluminosos são intensivamente utilizados em vários segmentos industriais como: siderurgia, fabricas de cimento, industria do alumínio, etc. (HARPER, 2001).

Na siderurgia, em aplicações como altos-fornos, carros-torpedo e painelas de aço; têm sido substituídos por produtos mais nobres como os aluminosos, os de $Al_2O_3 - SiC - C$, como consequência das condições operacionais mais agressivas a que estão sendo submetidos os refratários nestes equipamentos (HARPER, 2001).

Os refratários sílico-aluminosos resultam da combinação de argila calcinada (chamote sílico–aluminosos), agalmatolitos e argila criva, podendo ou não conter aditivos auxiliares de multitização como alumina calcinada. São produtos de custo relativamente baixo, devido à abundância das matérias-primas básicas que são as argilas e agalmatolitos (DUARTE, 2004).

4.2. Matérias-Primas para Refratários

As matérias-primas utilizadas no processamento de refratários apresentam grandes variações em relação à composição química, constituição mineralógica, pureza, estrutura física e química, tamanho médio e distribuição de partículas e de preço. Estas matérias-primas pertencem a três grandes grupos (DUARTE, 2004; MATTOS, 2009):

- a) Matérias-primas naturais: em ritmo decrescente de utilização, devido às exigências de pureza;
- b) Matérias-primas industrializadas: que são beneficiadas para remover impurezas ou mudar a sua estrutura/arranjo;
- c) Compostos químicos: orgânicos ou inorgânicos que passam por extensos processamentos químicos.

As principais matérias-primas dos refratários são: magnesita, dolomita e alumina. Além destes, há outros componentes utilizados em menor escala na produção dos refratários como grafita, cromita, zircônia e ligantes. Apesar de todos estes minerais possuírem propriedades resistentes às altas temperaturas, eles não são substituíveis entre si durante o processo de fabricação (MAGNESITA REFRAATÁRIOS S.A., 2014).

4.2.1. Matérias-primas para refratários aluminosos e sílico-aluminosos

As matérias-primas utilizadas na produção de um tijolo refratário aluminoso ou sílico-aluminoso variam de acordo com as propriedades finais que se espera obter, porém as principais matérias-primas podem ser divididas em duas famílias:

- a) Sílico-aluminosos: minerais argilosos com teor de alumina após calcinação inferior a 50%. Tipos argilominerais utilizados: caulins, agalmatolitos, bentonitas, argilas plásticas, feldspatos, chamotes, argilominerais calcinados e estabilizados a temperaturas em geral superiores a 1400°C (SILVA,2006; HARPER, 2001).
- b) Aluminosos: minerais argilosos com teor de alumina após calcinação superior a 50%. Frequentemente são compostas por hidróxidos de alumínio (gibbsita ou hidrargirita) e caulinita, com impurezas de óxidos de ferro e titânio. Outros tipos de matérias-primas aluminosas: chamote, argilominerais calcinados e estabilizados (a temperaturas superiores a 1500°C), silimanita, cianita e andalusita ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) e mulita eletrofundida ($3 Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$) (MUNZ & FETT, 1999; SILVA,2006).

O chamote é um produto obtido através da calcinação da argila e apresenta elevada estabilidade volumétrica. Após a calcinação o chamote é submetido à cominuição (britagem e moagem), para obter as frações granulométricas específicas para serem usadas nas massas sílico-aluminosas ou aluminosas (MUNZ & FETT, 1999).

4.2.2. *Propriedades das matérias-primas para refratários aluminosos e sílico-aluminosos*

As matérias-primas utilizadas para refratários têm propriedades específicas que estão associadas à natureza das fases constituintes. Os principais fatores que afetam a natureza e a proporção dessas: composição química, relação $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$, impurezas distribuição granulométrica, compacidade do sistema e fatores de queima (temperatura tempo e atmosfera do forno) (HARPER, 2001).

As impurezas tendem a reduzir a refratariedade do sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, as principais impurezas e seus limites de aceitação em refratários sílico-aluminosos são: $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 3,0\%$, $\text{TiO}_2 < 4,0\%$, $\text{CaO} < 0,1\%$, $\text{MgO} < 0,1\%$, $\text{Na}_2\text{O} < 0,8\%$ e $\text{K}_2\text{O} < 0,8\%$ (DUARTE, 2004). Vale ressaltar também que, as impurezas provocam aumento da quantidade de fase vítrea acarretando afetando as propriedades finais do produto. As principais propriedades que os materiais refratários devem possuir são as seguintes (HARPER, 2001; DUARTE, 2004):

a) Refratariedade intrínseca: a refratariedade intrínseca é função da relação $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ e do teor de impurezas. Quanto maior o teor de Al_2O_3 menor o teor de impurezas e então maior será a refratariedade intrínseca.

b) Refratariedade sob carga (RSC) e resistência ao escoamento: a RSC e resistência ao escoamento estão também intimamente relacionadas com o teor de Al_2O_3 e com o nível de impurezas. Quanto menor o nível de impurezas e maior o teor de Al_2O_3 menor será a resistência á deformação a quente de sistema aluminosos.

Produtos particularmente resistentes ao escoamento são os refratários de mulita eletrofundida da classe 72% - Al_2O_3 , destinados ao revestimento de cowpers. O habitus acicular da mulita, aspecto microestrutural, explica a elevada resistência no escoamento dos sistemas à base de mulita.

c) Resistência ao choque térmico (RCT): os refratários aluminosos e sílico-aluminosos apresentam em geral alta RCT devido aos baixos coeficientes de expansão térmica das fases majoritárias (mulita e corindon). Para sistemas com o mesmo nível de impurezas, quanto maior o teor de Al_2O_3 pior é a resistência ao choque térmico, devido ao mais alto coeficiente de expansão térmica do corindon em relação à mulita. Em matérias-primas aluminosas a percentagem de fase vítrea formada é variável e dependendo da sua extensão afeta a RCT.

A relação de matérias-primas, buscando minimizar o teor de impurezas e consequentemente o teor de fase vítrea, conduz a melhores níveis de RCT. A mulita sintética e andaluzita são exemplos de matérias-primas aluminosas usadas com um dos objetivos de aprimorar a resistência ao choque térmico. A temperatura de queima também influencia a RCT, quanto mais alta menor é a RCT.

d) Resistência à escória: a fase vítrea é mais resistente a escórias ácidas, entretanto apresenta baixa resistência à escórias básicas e aquelas com alto teor de FeO. Vale lembrar que, o corindon é mais resistente do que a mulita frente a escórias básicas, devido ao seu caráter.

Quanto à resistência a alcalis, os refratários aluminosos são superior aos sílico-aluminosos, no entanto são inferiores aos de carbetto de silício (SiC) ligados a nitrato de silício. Em sistemas aluminosos submetidos ao ataque de alcalis forma-se alumina beta, fragilizando a textura do refratário, reduzindo consequentemente sua resistência a abrasão e erosão.

e) Condutividade térmica: varia de acordo com a porosidade, ou seja, quanto maior o teor de Al_2O_3 e menor a porosidade e maior será a condutividade térmica.

f) Resistência mecânica a quente (RFQ): é função da quantidade e viscosidade da fase vítrea, da forma e distribuição dos cristais de corindon e mulita, da fase ligante presente na matriz e da porosidade aparente. Quanto menor a quantidade da fase vítrea e mais desenvolvidos os cristais de mulita e corindon, maior será a resistência a flexão a quente. Em geral a RFQ é avaliada a $1400^{\circ}C$ após encharcamento de 3 horas.

4.3. Processo de Fabricação de Tijolos Refratários

O processo de fabricação de tijolos refratários passa por varias etapas, tais como: cominuição, homogeneização dos sistemas particulados, presagem, secagem e sinterização.

4.3.1. Cominuição: Britagem e Moagem

É a operação de fragmentação que agrupa um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir, por ação mecânica externa e algumas vezes interna, um sólido, de determinado tamanho em fragmentos de tamanho menor (LUZ, 2010; MATOS, 2009).

A fragmentação de um material heterogêneo visa liberar os minerais valiosos dos minerais de ganga (não valiosos) ou no caso de um material homogêneo reduzir até o tamanho necessário para sua utilização (MATOS, 2009). A operação de fragmentação compreende diversos estágios que se aplicam ao minério, desde a mina (desmonte) até sua adequação ao processo industrial (britagem e moagem) (LUZ, 2010).

Na etapa de lavra o desmonte ocorre com o auxílio de explosivo ou equipamentos apropriados (tratores, escavadeiras, etc.). Esta etapa pode ser vista como o primeiro estágio de fragmentação (MATOS, 2009). A Britagem é a operação que fragmenta os blocos obtidos na lavra, esta operação pode ser repetida diversas vezes, mudando-se o equipamento até obter-se o material do tamanho desejado (MATOS, 2009). A Moagem é a operação de fragmentação fina obtendo-se nela um produto adequado à concentração ou a outro processo industrial (JILLAVENKATESA, 2001).

4.3.1.1. Britagem

Britagem pode ser definida como um conjunto de operações que objetiva a fragmentação de blocos de minérios levando-os a granulometria compatíveis para utilização direta ou para posterior processamento (JILLAVENKATESA, 2001). É o primeiro estágio no processamento de minérios (MATOS, 2009).

Não existe um circuito padrão para britar os diferentes tipos de minério. Geralmente a operação de britagem é feita dentro dos estágios convenientes. Quanto aos estágios de britagem não há rigidez, porém, normalmente se usa a classificação mostrada na tabela 1 (MATOS, 2009).

Tabela 1 – Estágios de Britagem.

Estágio de Britagem	Tamanho Máximo de Alimentação (mm)	Tamanho Máximo de Produção (mm)
Britagem Primária	1000	100
Britagem Secundária	100	10
Britagem Terciária	10	1
Britagem Quartenária	5	0,8

Fonte: MATOS, 2009 (modificada).

Britagem Primária

Os britadores empregados neste estágio são os de grande porte e sempre operam em circuito aberto e sem o descarte (escalpe) da fração fina contida na alimentação. A britagem primária é realizada a seco e tem uma razão de redução em torno de 8:1 (MATOS, 2009). Para este estágio são utilizados os seguintes britadores: britador de mandíbulas; britador giratório; britador de impacto; britador de rolo dentado (LUZ, 2010; MATOS, 2009).

Britagem Secundária

Entende-se por britagem secundária, de forma geral, todas as gerações de britagem subsequentes à primária. Na maioria dos casos, tem-se como objetivo a redução granulométrica do material para a moagem. É comum na britagem secundária o descarte prévio da fração fina na alimentação, com a finalidade de aumentar a capacidade de produção. Esta operação é chamada de escalpe (MATOS, 2009). Os equipamentos normalmente utilizados são: britador de mandíbulas secundário; britador giratório secundário; britador de martelos (impacto); britador cônico; britador de rolos (LUZ, 2010; MATOS, 2009).

Britagem Terciária

Em geral é o último estágio de britagem, no entanto, existem usinas com mais de três estágios, cujo fato está ligado às características de fragmentação do material, ou à granulometria do produto final. Os equipamentos em geral utilizados são os britadores cônicos, com uma razão de redução de 4:1 a 6:1 (LUZ, 2010; MATOS, 2009). Esta etapa exige maior controle da operação, geralmente trabalha-se em circuito fechado (MATOS, 2009).

Britagem Quaternária

Em geral a britagem quaternária é substituída pela moagem. A distribuição granulométrica da alimentação é importante na escolha do tipo de instalação para a britagem. Assim, por exemplo, o conteúdo de finos na alimentação define ou não se é necessário um escalpe antes da alimentação do britador. Os fatores econômicos e operacionais podem definir a necessidade do escalpe e como regra geral toma-se como base o limite de 30% de finos na alimentação. Este procedimento só se aplica as britagens secundárias e terciária, pois podem conter conteúdo de finos que justifica a necessidade de escalpe prévio (MATOS, 2009).

O conteúdo de argila e umidade nos minérios impossibilitam praticamente a britagem em granulometria de 20-25 cm, pois dificultam o peneiramento e interferem na operação de alguns tipos de britadores (LUZ, 2010). Além disso, os minérios corrosivos impõem condições especiais na escolha dos materiais e equipamentos usados a britagem (MATOS, 2009).

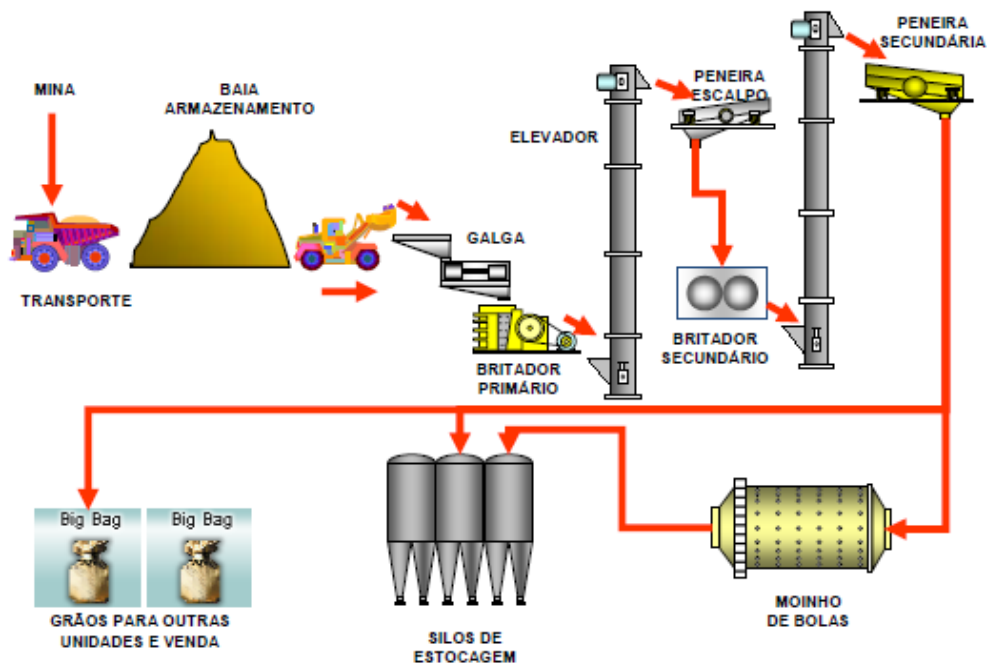
Os britadores são equipamentos que apresentam grande capacidade volumétrica de produção. Assim, a capacidade desses equipamentos, expressa em t/h, é proporcional à densidade do minério. Como a capacidade nominal é referente ao material com densidade 2,7 g/cm³, a capacidade real volumétrica para materiais com outras densidades pode ser expressa por: Capacidade Real = capacidade nominal x densidade real / 2,7 (LUZ, 2010; MATOS, 2009).

4.3.1.2. Moagem

A moagem é o último estágio do processo de fragmentação, como mostra a figura 1. Neste estágio as partículas são reduzidas, por de impacto, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado ao processo industrial (MATOS, 2009).

A moagem é a área da fragmentação que requer maiores investimentos, maior gasto de energia e é considerada uma operação importante para o desempenho de uma instalação de processamento mineral. Os equipamentos mais empregados na moagem são moinhos cilíndricos de barras, bolas e seixos (LUZ, 2010).

Figura 1 – Fluxograma do processo de cominuição.



Fonte: MATOS, 2009.

O tipo de arranjo de alimentação usado no moinho depende do circuito de moagem, que pode ser aberto ou fechado, a seco ou a úmido, o tamanho e a velocidade de alimentação são também importantes. Moinhos que operam a seco são usualmente alimentados por algum tipo de alimentador vibratório. Nos moinhos a úmido usam-se três tipos de alimentadores: *spoutfeeder*, *scoopfeeder* (alimentador bico de papagaio) e *drumfeeder* (alimentador de tambor) (MATOS, 2009).

Os moinhos de barras e bolas são muitas vezes classificados de acordo com a natureza do dispositivo de descarga da polpa durante a moagem. Em geral quanto mais próximo da periferia da carcaça e da boca de alimentação estiver situada a saída da polpa, mais rápido o material é descarregado e não ocorre a sobre-moagem. Nos moinhos de barras os tipos de descarga mais comuns são: transbordo, descarga periférica central e descarga periférica terminal e nos moinhos de bolas os tipos de descarga mais comuns são: descarga por grade e descarga por transbordo (MATOS, 2009).

A importância da operação de moagem na indústria reside no fato que a maior parte da energia gasta no processamento mineral é absorvida pela operação de moagem. Isto nos leva a afirmar que a maior parte do custo de tratamento depende desta operação e, portanto, sua

otimização constitui um constante desafio aos operadores (LUZ, 2010; MATOS, 2009). Mas nem toda energia demanda pelo processo de moagem é utilizada na quebra das partículas. A movimentação dos corpos moedores consome grande parte da energia fornecida ao moinho, assim como outros fatores: velocidade de operação, fração do volume do moinho ocupado pela carga de meio moedor (fator de enchimento), percentagem de sólidos na polpa, tamanho do meio moedor e carga circulante (LUZ, 2010).

4.3.2. Homogeneização de sistemas particulados

É uma operação mecânica onde busca-se a homogeneização química e física de dois ou mais elementos que envolvem transporte de massa em sistemas de gás, líquido ou sólidos, sendo o último o mais complexo (RICHERSON, 2005).

Nenhuma mistura de sólidos pode ser completamente homogeneizada. Devido ao tamanho finito das partículas, é possível em princípio retirar uma amostra pequena o suficiente para que variações estatísticas na composição sejam significativas. A rigor, todas as misturas são heterogêneas quando examinados numa escala menor que a menor partícula do sistema. Isto revela que antes de se falar em homogeneidade ou homogeneização é importante definir a escala do escrutínio (BARSOUM, 2002).

4.3.2.1. Mecanismos de Mistura

As operações mecânicas de mistura dos sistemas particulados sempre envolvem o transporte de material para produzir os efeitos desejados. Então, o mecanismo básico associado a qualquer processo mecânico de mistura é o mecanismo por transporte de massa. Este mecanismo pode ser agrupado em três classes gerais (RICHERSON, 2005; BARSOUM, 2002):

- a) Convecção: o processo de mistura por convecção geralmente é um fenômeno macroscópico envolvendo o movimento coletivo de grupos de partículas.
- b) Cisalhamento: aumenta a interface entre os componentes alterando a sua forma.

c) Difusão: a mistura é similar a mistura de gases e líquidos e envolve o movimento aleatório das partículas individuais, em resposta a algum tipo de agitação mecânica, é através da difusão que é conseguida a homogeneidade em nível individual de partícula.

4.3.2.2. *Processo de Mistura*

O processo de mistura é uma combinação de todas as operações necessárias, para que num determinado tempo e temperatura, o misturador possa transferir energia suficiente às matérias-primas (agregados, aditivos e ligantes) capazes de distribuir todas as partículas de forma aleatória dentro do misturador, de maneira que a mistura além de apresentar-se homogênea, tenha plasticidade (trabalhabilidade) propícia à prensagem. O produto resultante do processo de mistura é a massa, que pode ser definida como a combinação da distribuição homogênea da matéria-prima, granulometria e plasticidade propícia à aplicação refratária. Para garantir a qualidade da massa que será preparada para a prensagem, deve-se controlar, principalmente, os seguintes itens (HARPER, 2001):

a) Sequência de mistura: são as etapas de adição dos componentes (matérias-primas) e alterações de velocidade do misturador ao longo do tempo. É de fundamental importância que se cumpra as etapas de dosagem dos componentes da mistura, pois a mesma garantirá uma homogeneização perfeita dos aditivos em toda a mistura, bem como uma melhor qualidade final da massa.

b) Granulometria da massa: a distribuição granulométrica de qualquer massa refratária é projetada visando obter uma curva de empacotamento que será responsável por propriedades específicas para uma dada aplicação. O atendimento à curva de empacotamento é um dos fatores mais importantes a serem observados, para o cumprimento das características finais do produto (OLIVEIRA, *et al*, 2000).

Quando as massas apresentam granulometria muito fina ou muito grossa em relação à típica do critério de fabricação, afetam diretamente as condições de prensagem, gerando defeitos no refratário (ex: segregação, laminação, trincas, etc.) e como consequência o não atendimento das características finais do produto (MATOS, 2006).

c) Tempo de mistura: tempo necessário para que a massa apresente granulometria e plasticidade ideal. Os tempos de mistura definidos nos procedimentos devem ser

seguidos, pois o cumprimento dos mesmos garantirá uma boa homogeneização das matérias-primas, aditivos e ligante, além de ser responsável pela trabalhabilidade desejável da massa.

d) Quantidade de ligante: peso ou volume de ligante indicado no critério de fabricação em relação à quantidade total de massa seca no misturador. O ligante poderá em algumas condições, facilitar a prensagem do refratário e atingimento a resistência a cru necessária, porém com grande risco de produzir refratários com defeitos (trincas e laminações). Porém, uma dosagem errada de ligante poderá também comprometer as características do refratário, com dificuldade na sua prensagem e geração de defeitos.

4.3.3. Prensagem

É uma operação de conformação baseada na compactação de uma massa contida no interior de uma matriz rígida (forma), através da aplicação de pressão (força sobre uma área definida) (ÁLBARO, 2001).

A prensagem é o procedimento de conformação mais utilizado pela indústria refratária devido a: elevada produtividade, facilidade de automação, capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas (ÁLBARO, 2001).

Prensagem Uniaxial é a técnica de conformação de peças mais empregada no processamento de materiais refratários, consiste na compactação de uma massa contida na cavidade rígida de uma forma, mediante a aplicação de pressão em apenas uma direção axial através de um punção rígido (RICHERSON, 2005; BARSOUM, 2002).

A prensagem isostática ocorre quando a compactação do pó se dá no interior de um molde flexível, sobre o qual atua um fluido pressurizado. Este tipo de prensagem assegura uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície do molde. É empregado na fabricação de peças de formas mais complexas ou em peças onde uma das dimensões é muito maior que as demais, como no caso de tubos e barras (RICHERSON, 2005).

Controlar o processo significa “manter estável” e melhorar um conjunto de causas/fatores que afeta os vários itens de controle, verificação, do equipamento/processo que está sendo observado, tanto como os posteriores. No processo de conformação “prensagem” são controlados os seguintes itens (RICHERSON, 2005; BARSOUM, 2002; MATOS 2006):

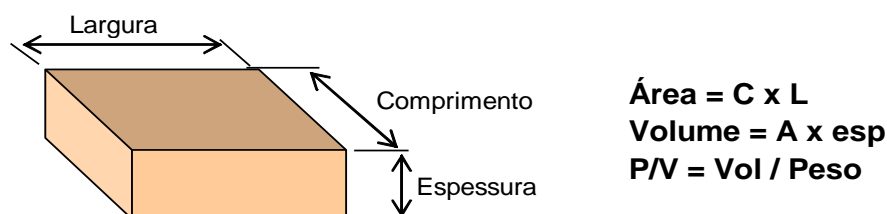
a) Equipamento: são registradas as regulagens realizadas pelo operador na prensa, tais como: número de batidas (leves e fortes), pressão de acionamento da batida (leve e forte), curso do martelo, situação do couro, pressão aplicada, número de compactações, número de ejeções, etc, necessárias para obtenção de um produto em acordo com as especificações.

b) Produto: são controladas as dimensões do tijolo prensado, o P/V (peso/volume) cru (conforme critério de fabricação) e o aspecto visual “atributo” (conforme procedimento).

No processo de prensagem temos vários itens que devem ser avaliados na peça já prensada, para garantir a qualidade da peça antes que ela seja empilhada para seguir o fluxo no setor de tratamento térmico. É importante frisar que as falhas geradas no processo de prensagem devem ser identificadas antes de seguir o fluxo, pois antes do tratamento térmico o tijolo pode ser reprocessado com maior facilidade e ser reutilizado como matéria-prima para o mesmo tipo de tijolo sem perder suas propriedades iniciais, além de minimiza o valor gasto, como o custo agregado no processo de queima, no processo de fabricação da peça que será refugada.

Itens avaliados em peças prensadas: Dimensões, cantos/arestas quebrados, trincas, rebarbas, assimetria; cunhagem (não paralelismo), diferença de cordas, fora de esquadro, empeno, ovalização (de válvulas), abaulamento nas laterais e cabeceiras, laminação, segregação e densificação “P/V cru”. A densificação “P/V cru” (Figura 2) é uma das principais características objetivadas na produção de peças prensadas é uma compactação ideal da massa: peso x volume, chamada de P/V cru, retrata a densidade geométrica a verde da peça.

Figura 2 – Cálculo de densificação de tijolos - P/V Crú



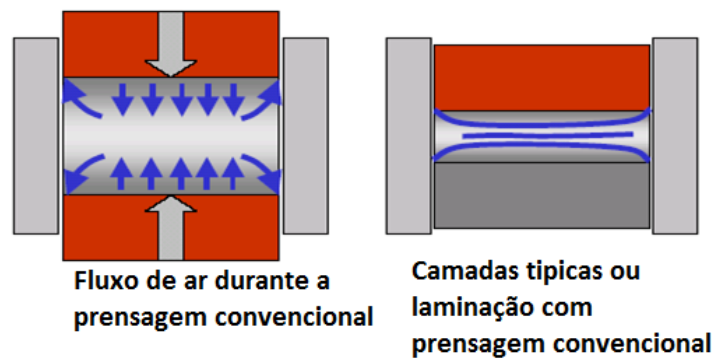
Fonte: MATOS, 2006.

Defeito de Prensagem

Alguns dos problemas e defeitos mais frequentes que aparecem ao longo do processo de fabricação de peças refratárias conformadas por prensagem uniaxial devidos a uma inadequada realização desta operação são: compactidade inadequada da peça, desgaste do molde por abrasão, descontinuidade estrutural e falta de uniformidade da compactidade no interior da peça (MATOS, 2006; RICHERSON, 2005; BARSOUM, 2002). Entre os defeitos de presagem destaca-se:

- a) Laminações: perpendicular ao sentido de extração da peça (Figura 3). Às vezes são imperceptíveis após prensagem e/ou cura. Possuem origem nas tensões desenvolvidas na superfície da peça devido ao atrito com a parede do molde ou pelo fluxo viscoso dos líquidos e gases. Podem ser minimizadas através da redução da pressão aplicada, alteração na distribuição granulométricas, alteração no desenho do molde, e uso de ligante mais adequado.

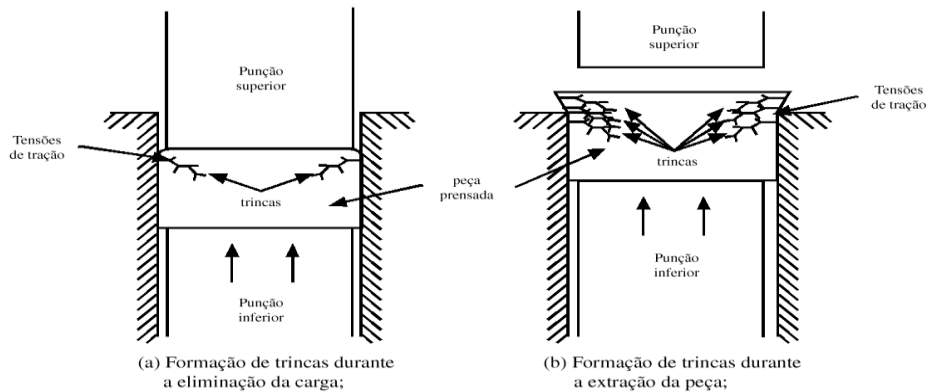
Figura 3 – Representação do defeito tipo laminação



Fonte: MATOS, 2006.

- b) Trincas: o surgimento de trincas na peça prensada pode ter diferentes motivos. Os mais frequentes são: desenho inadequado do molde, excesso de ar aprisionado durante a fase de compactação, excessiva expansão da peça durante sua extração do molde, fricção elevada entre a peça e a parede do molde durante a extração e alta velocidade de extração. A figura 4 mostra a formação de trincas.

Figura 4 - Representação esquemática da formação de trincas



Fonte: MATOS, 2006.

4.3.4. Secagem

A secagem é uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação de cerâmica. É comum nesta etapa ocorrerem defeitos de secagem nas peças e que são perceptíveis somente após queima. O objetivo da secagem é o de eliminar a água, utilizada na etapa de conformação (água de conformação), necessária para a obtenção da plasticidade da massa. A eliminação de água ocorre por evaporação através mediante a presença do calor (ABAJO, 2000; AMARANTE & BOUTROS, 1981).

A água de conformação pode ser dividida em dois tipos: água intersticial e água livre ou água de plasticidade. A água intersticial está relacionada com a água necessária para preencher os poros das partículas. Já a água de plasticidade localiza-se entre as partículas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação.

A água livre ou água de plasticidade é responsável pela retração das peças. A retração que as peças de cerâmica sofrem durante a etapa de secagem é um parâmetro de grande importância tecnológica. Durante a secagem são geradas tensões que podem levar ao aparecimento de defeitos que comprometem a qualidade das peças. A evolução da retração linear de secagem em função da perda de água de conformação é representada através da chamada curva de Bigot. A curva de Bigot é uma representação gráfica da percentagem de água de conformação em função da retração de secagem. O conhecimento desta curva auxilia no estabelecimento de um ciclo de secagem, ou seja, permite otimizar o tempo de secagem de forma que as peças não apresentem defeitos (ABAJO, 2000; BELTRAN et al., 1995).

4.3.5. Sinterização

A sinterização é um processo no qual o material, uma vez compactado, recebe tratamentos térmicos e a temperatura de processamento é menor que a sua temperatura de fusão. Este processo cria uma alteração na estrutura microscópica do elemento base. Isto ocorre devido aos “mecanismos de transporte”, estes podem ser consecutivos ou concorrentes cujo objetivo é obter uma peça sólida coerente. Durante o processo, ocorrem reações no estado sólido do elemento que são ativadas termicamente. Algumas podem ocorrer espontaneamente quando a base atinge uma temperatura determinada (EXNER, 1979).

Existem, principalmente, dois tipos básicos de sinterização: a sinterização por fase sólida e a sinterização por fase líquida. Estes dois tipos são capazes de densificar total ou parcialmente a estrutura, sendo que com o primeiro tipo é possível se obter uma estrutura com porosidade controlada, enquanto que o fechamento total da porosidade é mais facilmente obtido através da sinterização por fase líquida (SILVA e ALVES JUNIOR, 1998).

Na sinterização por fase sólida, o material é transportado sem que haja formação de líquido na estrutura. Existem diversas formas de transporte de material: por fluxo viscoso, por difusão atômica ou por transporte de vapor. Em todos estes casos, o material é transferido para a região de contato entre partículas vizinhas. Outras formas de transporte devem ser consideradas pois envolvem deslocamento de partículas inteiras, como deslizamento e rotação de partículas, e não deslocamento de átomos individuais. Sejam quais forem os mecanismos atuantes, rigidez e densificação são atingidas pelo aumento da área de contato entre as partículas e o melhor empacotamento de matéria (SILVA e ALVES JUNIOR, 1998).

A sinterização por fase líquida acontece devido à formação de líquido na estrutura. Este líquido pode ser causado pela fusão de um dos componentes do sistema ou pode ser o resultado de uma reação entre, pelo menos, dois dos componentes do sistema. A formação deste líquido tem papel decisivo no aspecto final da estrutura sinterizada. A sinterização com fase líquida é um modo muito utilizado em materiais dificilmente sinterizáveis por fase sólida (SILVA e ALVES JUNIOR, 1998).

Ressaltando que, para que a peça apresente uma sinterização adequada é preciso desenvolver fase líquida suficiente com viscosidade apropriada para alcançar a porosidade desejada e a variação da quantidade de fase líquida e sua viscosidade deve ser gradual com a

temperatura, para que as alterações de retração linear e a absorção de água também o sejam (EXNER, 1979).

As indústrias de processamento vêm nos últimos anos reduzindo o tempo de sinterização e realizando um maior controle na temperatura de queima. Como consequência disso, houve redução nos custos e grande aumento de produtividade (MAGALHÃES *et al.*, 2014).

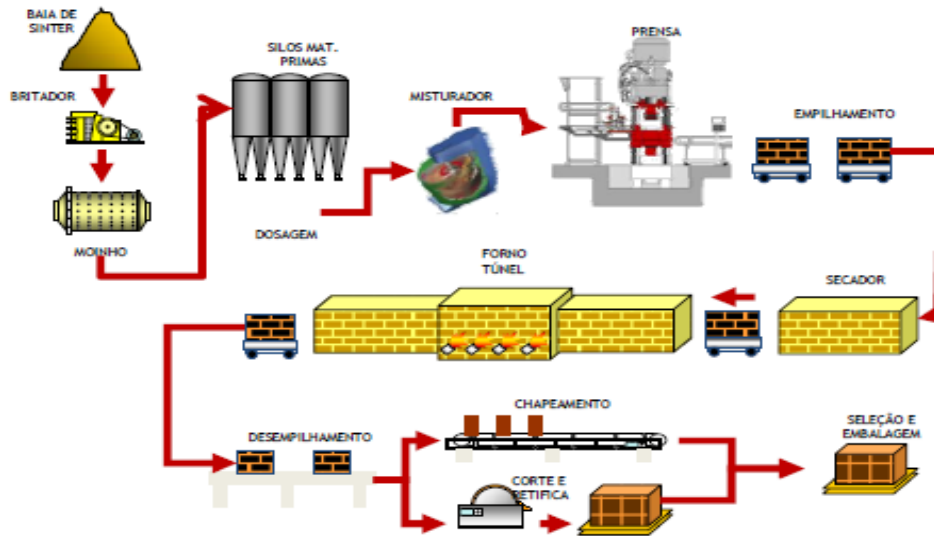
Uma importante consideração a respeito dos tempos de sinterização se relaciona ao fato de que quando maior a duração, de maneira geral, favorecem a diminuição das temperaturas necessárias para se obter as propriedades mais importantes desejadas. Mudanças nas condições de queima podem acarretar significativamente em mudanças na densidade e, conseqüentemente, na característica dos poros. Além disso, ciclos de sinterização significativamente curtos podem acarretar na produção de grande volume de poros fechados. Desta forma, podem ser ocasionados problemas de desempenho mecânico dos produtos (EXNER, 1979).

4.4. Processo de Fabricação de Tijolos Refratários Utilizado na Magnesita

Os processos de fabricação de tijolos refratários podem variar de acordo com o produto que se deseja obter ou de acordo com os tipos de matérias-primas utilizadas. Neste estudo foi descrito a título de exemplo o processo de fabricação utilizado pela Magnesita Refratários S.A., como mostra o fluxograma da Figura 5.

O processo de produção inicia-se com a preparação da matéria-prima. As matérias-primas previamente cominuídas e beneficiadas são armazenadas em silos diferentes, de acordo com a sua granulometria e propriedade química. Após a moagem e armazenamento, formula o preparo da massa refratária seguindo os procedimentos operacionais, os critérios de fabricação e as cartas de dosagem predefinidas pela Magnesita (MATOS, 2009).

Figura 5 - Processo padronizado utilizado na fabricação de refratários.



Fonte: MATOS, 2009.

Após a preparação da massa, ela é transportada para a área de prensagem, onde a prensa é abastecida e a massa sofre a conformação, dando forma a um tijolo cru (MATOS, 2009). Durante o processo de prensagem existem vários fatores que podem acabar gerando um rejeito de produção, como por exemplo, possíveis vazamentos de massa durante o transporte para a prensa ou na própria prensa, as não conformidades (cantos e arestas quebradas) e os materiais prensados fora das dimensões preestabelecidas.

As falhas geradas e/ou identificadas no processo de prensagem dão origem aos rejeitos de quebra crua, que são mais fáceis de serem retrabalhados e de retornarem ao processo por não terem sofrido o tratamento térmico, mas, mesmo assim representam uma grande perda (perda de tempo, desgaste precoce do maquinário, perda de massa, etc.) quando se analisa a produtividade como um todo.

Os tijolos dentro das especificações seguem o fluxo normal de produção, são então empilhados, seguindo padrões de empilhamento, e encaminhados primeiramente para um secador, onde ocorre a remoção de umidade de maneira mais branda para evitar explosões e trincas, e então para um forno túnel onde ocorre a queima do tijolo. Na queima, ocorre a remoção do restante da água, além de reações químicas fundamentais para a utilização final do mesmo, proporcionando uma melhora de suas propriedades mecânicas e refratárias (MATOS, 2009).

Após o tratamento térmico os tijolos são desempilhados e inspecionados para garantir que nenhuma peça fora da especificação siga processo. Algumas destas não conformidades podem ser toleráveis e até reparáveis, como por exemplo, dimensões ligeiramente maiores, que podem corrigidas através de retifica, ou alguma coloração inadequada que não vá interferir na vida útil do refratário. A maioria das não conformidades observadas após o tratamento térmico, por serem mais críticas como o caso de trincas e laminações não é passível de correções e devem ser rejeitadas (DUARTE, 2004).

As peças conformes seguem o fluxo para os acabamentos finais que podem ser requeridos de acordo com o destino final da peça, como alguma pintura especial ou chapeamento. Após a inspeção final os tijolos são embalados e encaminhados para os centros de distribuição (MATOS, 2009).

4.5. Reciclagem de Refratários

A geração de rejeitos refratários está intimamente relacionada com a produção de aço, pois são necessários 10 kg de refratário para produzir uma tonelada de aço em média. Estima-se que 510.000 toneladas de rejeitos refratários são geradas por ano nas indústrias siderúrgicas e com potencial para aumentar a cada ano (DUARTE, 2010).

Sabe-se que os materiais refratários de pós-consumo podem retornar ao processo após transformados em novos refratários através de moagem, briquetagem, separação magnética e classificação. O material reprocessado não entra na mesma linha de produto no qual foi fabricado e sim em uma linha de produtos inferiores, para evitar perda das propriedades químicas e físicas do material inicial. A Magnesita S/A vem trabalhando na área de reciclagem de refratários pós-consumo. As indústrias siderúrgicas separam o material de pós-consumo por sua especificação e utilização e a Magnesita S/A coleta esse material mediante acordo de compra ou troca para tratamento, reciclagem ou reuso (DUARTE, 2010).

Os tijolos moídos além de serem utilizados como matéria-primária em novos produtos, também podem ser utilizados como condicionador de escória, ou seja, um produto do processo produtivo de aço não atuante como refratário e sim como um produto que protege o refratário do ataque da escoria durante o processo produtivo, condicionando a escoria com as propriedades que seriam extraídas dos tijolos do forno ou forno panela (ZIMMER et al., 2004).

Devido a sua composição química que contém óxido de magnésio o material refratário reciclado pode ser utilizado na agricultura como regulador de pH do solo e também para a produção de adubos químicos. Os materiais refratários de pós-consumo que ainda contém agregados metálicos podem ser utilizados em pavimentação intertravada e construção civil. Os produtos refratários do tipo válvula gaveta, que são encapsulados com parte metálica, são mais difíceis de reciclar, pois envolvem um processo mais complexo, porém estão sendo utilizados na fabricação de peças para as usinas siderúrgicas (abóboda de fornos elétricos) (ZIMMER et al., 2004).

Os impactos ambientais gerados pelos refratários são bem complexos devido à diversidade de matéria-prima utilizada, método de processamento e matrizes energéticas utilizadas. Entre elas o consumo natural não renovável, consumo de energia e água, geração de gases de efeito estufa, geração de rejeitos sólidos ao longo da cadeia e após uso industrial do produto refratário (ZIMMER et al., 2004).

Os impactos ambientais gerados podem ser minimizados através do aumento da vida útil dos refratários em uso, através da reciclagem e reutilização dos refratários de pós-consumo, porém restam os impactos ambientais provocados pela produção e pelo processamento onde o óxido de magnésio é processado gerando gases de efeito estufa (ZIMMER et al., 2004).

Estima-se uma produção de 43.000 Toneladas/mês de rejeitos refratários siderúrgicos. Portanto, pode-se afirmar que a reutilização de produtos refratários de pós-consumo irá inibir a extração de matéria-prima primária, como a magnesita e redução no consumo de óleo combustível. A Magnesita S/A tem trabalhado em tecnologia e sustentabilidade nessa questão de redução do impacto e reciclagem dos produtos, no ano de 2008 foram retiradas do mercado de siderurgia 26.000 toneladas de rejeitos refratários para serem reciclados e transformados em novos produtos (DUARTE, 2010).

Entretanto, não existe estudos sobre o reaproveitamento dos rejeitos gerados no próprio processo produtivo, especificamente das quebras que ocorrem durante e após o tratamento térmico (QPTT), uma vez que a reciclagem desse tipo de rejeito é realizado internamente na Magnesita Refratários S.A. Sabe-se que a quebra crua é totalmente reciclada, pois não ocorre alteração nas propriedades das matérias após presagem. Mas, o rejeito QPTT não é reutilizado no processo com a mesma proporção, devido a alteração das propriedades dos materiais constituintes.

4.6. Métodos utilizados para Análise Química

4.6.1. Espectrometria de fluorescência de raios X

Os testes realizados através da espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) podem apresentar objetivos diferentes: quantitativos ou qualitativos. Resumidamente, o material que está sendo analisado pode ser excitado por partículas diversas (íons, elétrons, etc.) que farão com que tais materiais imitam raios X característicos. Assim, o método de espectrometria de fluorescência de raios X se baseará na estipulação dimensional de quão intensos são tais raios emitidos pelos constituintes do material (MELO JÚNIOR, 2007).

Este método é fundamento na produção e detecção de raios X, que são radiações eletromagnéticas com comprimento de onda entre 0,003 e 3nm, emitidos pelos elementos químicos presentes no material analisado. A radiação eletromagnética que incide em tal material apresenta diversas interações, podendo ocasionar emissão, absorção e espalhamento de radiação eletromagnética (SKOOG *et. al.*, 2009).

Desta maneira, o método apresentado é capaz de identificar os elementos presentes em cada matéria-prima utilizada no processamento dos materiais cerâmicos, podendo servir de análise comparativa quanto à variação da composição química de cada amostra estudada.

4.6.2. Espectrometria de absorção atômica

A técnica analítica da espectrometria de absorção atômica baseia-se na medição realizada por átomos gasosos que devem estar em seus estados fundamentais da absorção de radiação específica. Sabe-se que no início do ensaio os átomos são impulsionados a estados excitados e como a frequência da radiação absorvida por eles é característica intrínseca do elemento químico, verifica-se a alta confiabilidade da técnica. Estipula-se um volume específico e desta maneira o número de átomos livres de tal elemento químico será proporcional à intensidade da absorção de radiação. A técnica de atomização eletrotérmica mais difundida é a Espectrometria de Absorção Atômica com Forno de Grafite (WELZ e SPERLING, 1999).

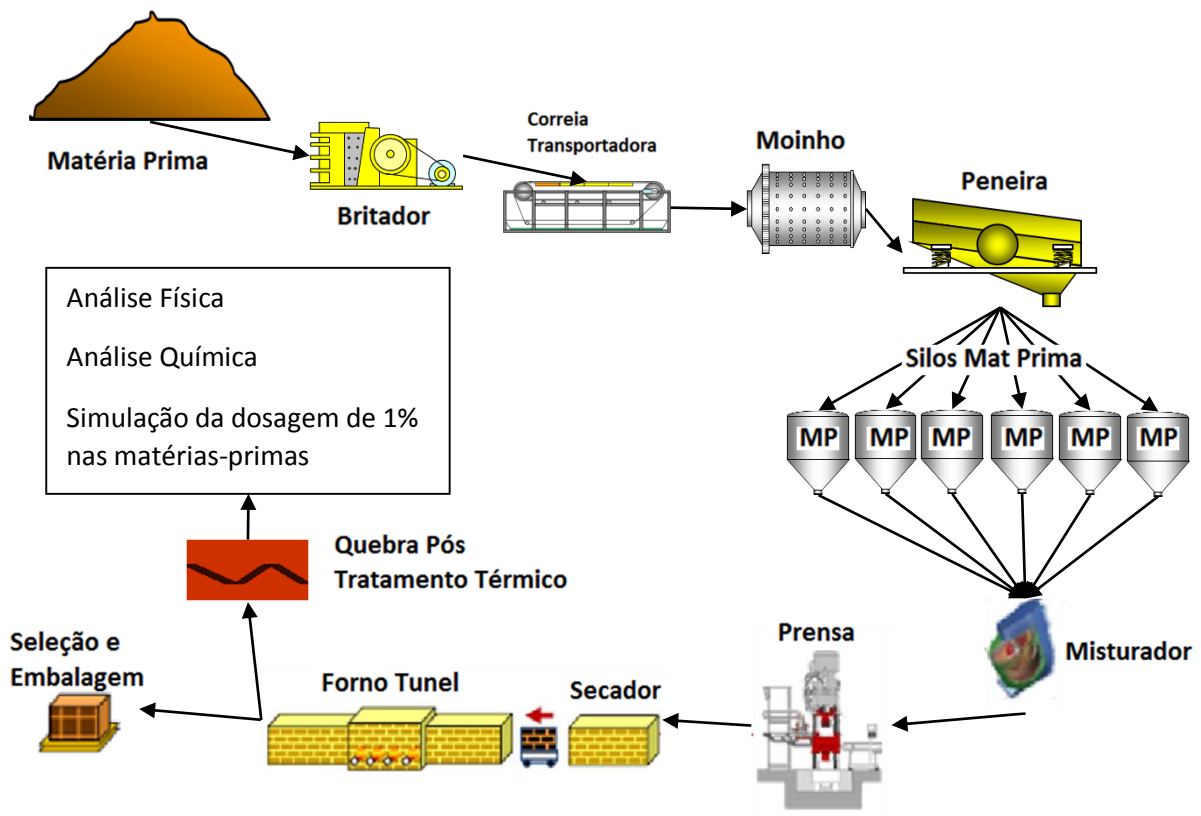
5. METODOLOGIA

Os processos mencionados, as marcas e matérias-primas analisadas, os dados de volume de produção, assim como os parâmetros característicos considerados são referentes aos processos e produtos da Magnesita Refratários S.A.

5.1. Materiais

O material em estudo é proveniente das quebras pós tratamento-térmico (QPTT) obtidas através do processo indicado no fluxograma da figura 6. O fluxograma mostra a etapa do processo em que o material é obtido e as análises que serão feitas com o mesmo.

Figura 6 – Fluxograma do processo produtivo em estudo com destaque para a obtenção do material em estudo e análises que serão realizadas no mesmo.



Fonte: O autor.

Foram analisadas as quebras pós tratamento-térmico referente a 49 tipos de tijolos produzidos pela Magnesita Refratários S.A. a partir de três matérias-primas denominadas de MP1, MP2 e MP3 utilizadas na produção dos tijolos aluminosos e sílico-aluminosos pela Magnesita. Estas matérias-primas passam por um beneficiamento (cominuição e separação granulométrica) dando origem a novas matérias-primas, que abastecem então a maioria dos silos utilizados na preparação das misturas, como indicado na figura 6. As referidas matérias-primas e suas especificações são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Especificações das matérias-primas

Parâmetros	MATÉRIA PRIMA		
	Especificações		
	MP1	MP2	MP3
Al₂O₃	43,00 - 46,00 %	69,00 - 72,00 %	83,00 - 87,00 %
SiO₂	47,00 - 50,00 %	21,00 - 24,00 %	7,50 - 11,50 %
Densidade aparente	2,60 - 2,66 g/cm ³	2,90 - 3,00 g/cm ³	3,22 - 3,30 g/cm ³
Porosidade aparente	3,50 - 6,00 %	2,75% - 5,00 %	2,00 - 5,00 %

Fonte: MAGNESITA REFRAATÁRIOS S.A., 2014 (modificada).

Durante o desenvolvimento da metodologia deste trabalho, foi observado que o estreitamento das faixas de especificação das matérias-primas poderia possibilitar que as QPTTs de todas as marcas em análise pudessem ser reutilizadas. Sendo assim, foi proposta uma redução nas faixas de especificações das matérias-primas MP1, MP2 e MP3 para que uma dosagem de 1% (simulada neste trabalho) com as quebras pós tratamento térmico, provenientes de qualquer um dos 49 tipos de tijolos em análise, possa ser realizada sem ultrapassar as reais especificações.

5.2. Análise Física

A densidade e porosidade aparente foram determinadas através de um ensaio padronizado conforme a Norma ABNT NBR 6220. Para o ensaio utiliza-se um corpo de prova de 100cm³ a 200cm³ do material refratário denso conformado, que após a remoção (feita com uma escova de aço) de pós e partículas que podem gerar desvios de massa tem o seu peso seco mensurado (Ms).

O corpo de prova é então saturado por fervura com água, vácuo com água ou querosene quando o material reage com água ou possui algum produto solúvel. Para realizar a pesagem da massa imersa (M_i), o corpo de prova deve ser mantido imerso no líquido saturante durante todo o processo. Após a determinação da massa imersa, o corpo de prova deve ter seu excesso de água retirado com um pano úmido ou um papel absorvente (no caso da utilização do querosene como líquido saturante), para que a massa saturada (M_u) possa ser determinada através de uma nova pesagem.

Com os valores de M_i , M_u e da massa específica do líquido utilizado (M_e), calcula-se o volume aparente (V_a) do corpo de prova, através da equação 1:

$$V_a = \frac{(M_u - M_i)}{M_e} \quad (1)$$

Para a densidade aparente (D_a) são utilizados os valores de M_s e V_a (equação 2):

$$D_a = \frac{M_s}{V_a} \quad (2)$$

Para o cálculo da porosidade aparente (P_a) utiliza-se a equação três:

$$P_a = \frac{(M_u - M_s)}{(M_e \times V_a)} \times 100 \quad (3)$$

As variáveis utilizadas para o cálculo dos parâmetros estão mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Identificação das variáveis utilizadas na determinação dos parâmetros das análises físicas.

Variáveis	Abreviações	Unidades
Massa Seca	M_s	g
Massa Imersa	M_i	g
Massa Umida	M_u	g
Massa Específica do Líquido	M_e	g/cm ³
Volume Aparente	V_a	cm ³
Densidade Aparente	D_a	g/cm
Porosidade Aparente	P_a	%

Fonte: O autor.

5.3. Análise Química

A análise química foi baseada nos teores de sílica e alumina determinados por espectroscopia de fluorescência de RaiosX (FRX) em um espectrômetro Philips PANalytical MagiX com amostrador automático PW 2540.

As amostras (pastilhas) foram preparadas a partir de um pó com granulometria inferior a 106 μm , obtido através da cominuição das QPTTs dos tijolos em análise. Para a fusão das pastilhas, também são utilizados tetraborato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) e brometo de lítio (LiBr) como agentes fundentes. Esse processo ocorre em uma máquina de fusão Vulcan da marca Fluxana.

A determinação semi-quantitativa dos teores de sílica e alumina foram então determinados através do software SuperQ da PANalytical para espectrometro FRX.

5.4. Simulação da Dosagem de 1%

A verificação da viabilidade da reutilização de rejeitos se deu através da simulação da dosagem de 1% de reprocessados, obtidos a partir de cada uma das quebras provenientes das 49 marcas, nas 3 matérias-primas.

A dosagem de 1% foi escolhida por ser uma dosagem pequena, promovendo apenas pequenas alterações nas propriedades, porém uma dosagem que pode proporcionar um ganho significativo de consumo de reprocessados, já que o volume de produção das matérias-primas superadas para a dosagem é muito grande.

A análise foi realizada levando-se em conta os teores de alumina e sílica, assim como a densidade e porosidade aparentes dos produtos acabados (que quando não conformes geram as QPTTs) e as especificações das três principais matérias-primas (MP1, MP2 e MP3) que compõe os tijolos em estudo. As impurezas não foram consideradas já as especificações dos tijolos se adequam as das matérias-primas.

Na simulação foi considerada uma dosagem de 1% em massa das QPTTs referentes à todos os tijolos em estudo (individualmente) nas matérias-primas. Foram utilizadas as médias das atuais faixas de especificações das três matérias-primas. Para os reprocessados foram considerados os limites inferiores de alumina (para uma maior refratariedade intrínseca) e densidade e limites superiores de sílica e porosidade (condições críticas), considerando as médias e os desvios padrões entre os resultados obtidos e os disponíveis nos históricos das análises químicas e físicas de cada marca de tijolo.

Foram calculadas todas as possíveis variações nas propriedades físicas e químicas obtidas através da simulação da dosagem de 1%. Para garantia da qualidade, foram consideradas as variações máximas (acima do limite superior) e mínimas (abaixo do limite inferior) calculadas conforme as médias, para uma proposta de estreitamento das faixas de especificações das matérias-primas, de tal forma que uma dosagem de 1% com qualquer um dos tijolos considerados possa ser realizada, garantindo que as reais especificações das matérias-primas e produtos sejam sempre alcançadas.

Para a simulação foi considerado a proporção de 1% de cada marca em 99% de cada matéria-prima, para cada propriedade, de acordo com a equação 4 abaixo:

$$\text{Simulação } ijk = (0,01 * \text{Prop. } i \text{ Marca } j) + (0,99 * \text{Prop. } i \text{ MP } k) \quad (4)$$

Foram simuladas 4 propriedades (i), com a dosagem de 49 marcas (j) em 3 matérias-primas (k) diferentes, totalizando 588 operações de simulação para este trabalho.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através das análises químicas e físicas dos tijolos em estudo estão nas tabelas 4 e 5, onde as marcas analisadas estão identificadas de 1 a 49. Estes resultados foram utilizados para a simulação da dosagem conforme descrito na metodologia deste trabalho. Ressaltando que, os resultados abaixo estão dentro das especificações definidas pela Magnesita Refratários S.A.

Tabela 4 – Resultado das análises químicas e físicas.

MARCA	Teor de Alumina	Teor de Sílica	Densidade Aparente	Porosidade Aparente
MARCA 1	99,14	0,43	3,29	16,4
MARCA 2	94,25	5,08	3,21	14,86
MARCA 3	94,06	5,17	3,17	15,36
MARCA 4	91,89	2,8	3,04	20,67
MARCA 5	89,72	7,07	3,1	17,29
MARCA 6	89,12	9,98	3,03	17,35
MARCA 7	88,81	10,35	2,91	18,54
MARCA 8	88,3	10,05	2,98	17,24
MARCA 9	87,2	7,18	3,04	16,03
MARCA 10	80,53	14,05	2,82	17,01
MARCA 11	79,72	15,14	2,78	17,17
MARCA 12	78,03	15,28	2,8	15,73
MARCA 13	77,16	6,88	3,04	9,3
MARCA 14	76,48	18,08	2,67	18,72
MARCA 15	76,28	18,09	2,69	18,82
MARCA 16	75,95	18,49	2,67	19,14
MARCA 17	75,8	19,25	2,68	18,75
MARCA 18	68,72	32,74	2,63	15,11
MARCA 19	68,69	30,19	2,59	15,25
MARCA 20	68,47	30,02	2,51	18,14
MARCA 21	68,36	29,93	2,49	18,74

Fonte: O autor.

Tabela 5 – Resultado das análises químicas e físicas.

MARCA	Teor de Alumina	Teor de Sílica	Densidade Aparente	Porosidade Aparente
MARCA 22	67,91	25,81	2,75	1,73
MARCA 23	67,65	31,37	2,57	15,16
MARCA 24	67,17	31,72	2,57	15,88
MARCA 25	66,98	32	2,59	16,67
MARCA 26	66,67	26,56	2,55	69,09
MARCA 27	66,32	26,5	2,63	12,32
MARCA 28	65,89	32,61	2,57	17,36
MARCA 29	65,48	28,1	2,52	18,01
MARCA 30	64,63	29	2,51	17,85
MARCA 31	62,33	21,14	2,67	15,05
MARCA 32	62,12	35,88	2,6	14,67
MARCA 33	57,55	37,28	2,43	18,38
MARCA 34	55,88	39,61	2,47	17,06
MARCA 35	54,3	40,04	2,38	19,66
MARCA 36	50,33	44,33	2,38	19,27
MARCA 37	48,29	46,12	2,34	18,26
MARCA 38	47,58	47,27	2,41	15,67
MARCA 39	47,11	47,28	2,4	16,17
MARCA 40	46,99	47,19	2,39	16,95
MARCA 41	45,98	49,69	2,32	16,87
MARCA 42	45,75	49,22	2,31	16,65
MARCA 43	45,39	49,38	2,35	16,15
MARCA 44	43,66	51,31	2,3	17,1
MARCA 45	43,38	26	2,55	16,99
MARCA 46	39,94	54,41	2,23	18,22
MARCA 47	39,5	54,93	2,26	16,6
MARCA 48	39,23	55,1	2,25	16,91
MARCA 49	38,04	55,7	2,23	16,61

Fonte: O autor.

A tabela 6 mostra as médias das faixas atuais que foram consideradas nos cálculos das dosagens, as variações máximas e mínimas observadas a partir da simulação e as novas faixas de especificações propostas para os parâmetros de cada matéria-prima.

As variações foram consideradas para propor uma nova faixa de especificação, para cada propriedade, ligeiramente mais estreita, que contemplaria o uso da dosagem dentro dos limites inferiores e superiores das faixa de especificação sem ultrapassar os limites das faixas de especificações originais. Ressaltando que, os limites superiores e inferiores foram calculados utilizando as equações 5 e 6:

$$\text{Novo Limite Sup} = \text{Limite Sup} - \text{Variação Máxima} \quad (5)$$

$$\text{Novo Limite Inf} = \text{Limite Inf} + \text{Variação Mínima} \quad (6)$$

Pode-se observar que a simulação da dosagem encontrou variações máximas e mínimas, considerando a média da faixa, que não excederam os limites superiores ou inferiores das faixas atuais das matérias-primas, permitindo assim o uso das matérias-primas na nova dosagem sem alterações relevantes nas propriedades finais dos produtos. As variações máximas e mínimas se dão respectivamente com as marcas que apresentam os valores mais discrepantes em relação aos das matérias-primas em análise, as variações máximas para as marcas com os valores mais elevados e as variações mínimas para as marcas com os menores valores.

Tabela 6 – Resultados da simulação da dosagem das marcas de tijolos nas matérias-primas.

MP	Parametros	Teor de Alumina	Teor de Sílica	Densidade Aparente	Porosidade Aparente
MP1	Especificação atual	43,00 - 46,00 %	47,00 - 50,00 %	2,60 - 2,66 g/cm ³	3,50 - 6,00 %
	Mediano	44,5	48,5	2,63	4,75
	Varição Máx	0,55	0,07	0,01	0,16
	Varição Mínima	-0,06	-0,48	0	-0,03
	Especificação Proposta	43,06 - 45,45 %	47,48- 49,93 %	2,60 - 2,65 g/cm ³	3,53 - 5,98 %
MP2	Especificação atual	69,00 - 72,00 %	21,00 - 24,00 %	2,90 - 3,00 g/cm ³	2,75% - 5,00 %
	Mediano	70,5	22,5	2,95	3,875
	Varição Máx	0,29	0,33	0	0,17
	Varição Mínima	-0,32	-0,22	-0,01	-0,02
	Especificação Proposta	69,32 - 71,71 %	21,22 - 23,67%	2,91 - 3,00 g/cm ³	2,77% - 4,83 %
MP3	Especificação atual	83,00 - 87,00 %	7,50 - 11,50 %	3,22 - 3,30 g/cm ³	2,00 - 5,00 %
	Mediano	85	9,5	3,26	3,5
	Varição Máx	0,14	0,46	0	0,17
	Varição Mínima	-0,47	-0,09	-0,01	-0,02
	Especificação Proposta	83,47 - 86,86 %	7,59 - 11,04%	3,23 - 3,30 g/cm ³	2,02 - 4,83 %

Fonte: O autor.

A tabela 7 apresenta os parâmetros atuais das faixas de especificação das matérias-primas e as novas especificações propostas que possibilitariam a utilização da dosagem de 1% das 49 marcas nas 3 matérias-primas como uma alternativa eficiente para o aumento do consumo das quebras pós tratamento térmico.

Tabela 7 –Especificações atuais e novas especificações propostas.

Parâmetros	MATÉRIA PRIMA		
	ATUAL		
	MP1	MP2	MP3
Al₂O₃	43,00 - 46,00 %	69,00 - 72,00 %	83,00 - 87,00 %
SiO₂	47,00 - 50,00 %	21,00 - 24,00 %	7,50 - 11,50 %
Densidade Aparente	2,60 - 2,66 g/cm ³	2,90 - 3,00 g/cm ³	3,22 - 3,30 g/cm ³
Porosidade Aparente	3,50 - 6,00 %	2,75% - 5,00 %	2,00 - 5,00 %
Parâmetros	PROPOSTO		
	MP1	MP2	MP3
	Al₂O₃	43,06 - 45,45 %	69,32 - 71,71 %
SiO₂	47,48- 49,93 %	21,22 - 23,67 %	7,59 - 11,04 %
Densidade Aparente	2,60 - 2,65 g/cm ³	2,91 - 3,00 g/cm ³	3,23 - 3,30 g/cm ³
Porosidade Aparente	3,53 - 5,98 %	2,77% - 4,83 %	2,02% - 4,83 %

Fonte: O autor.

A simulação da dosagem na matéria-prima MP1 apresentou menos de 1% de variação na média de todos os parâmetros analisados. As matérias-primas MP2 e MP3 apresentaram as máximas variações para a porosidade aparente, sendo respectivamente de 1,81% e 2,00%. Porém, a variação da porosidade aparente nesta proporção não é um fator crítico para a nova rota proposta neste trabalho, já que a matéria-prima ainda passará pelo processo de prensagem e tratamento térmico, onde “pequenos ajustes” nesta propriedade acontecem.

As médias das faixas de especificações atuais e propostas são comparadas através da variação percentual, conforme a tabela 8.

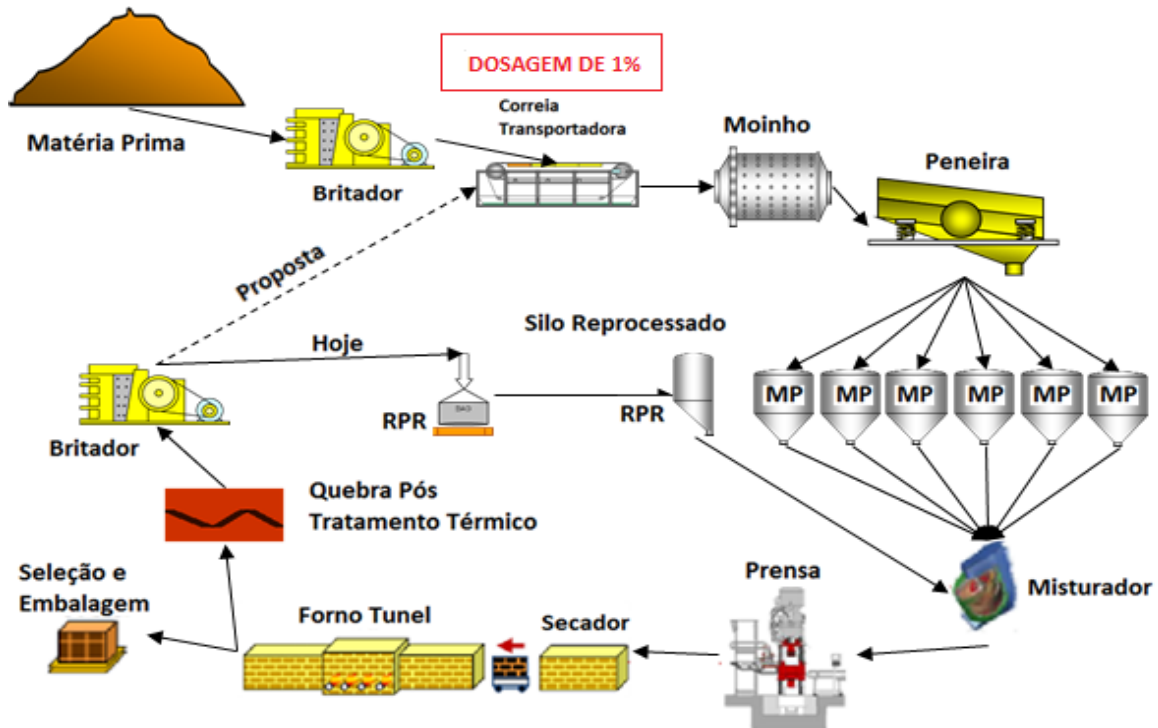
Tabela 8 – Comparativo das médias das faixas atuais e propostas de especificação das matérias-primas.

	Parâmetros	MEDIA ATUAL	NOVA MEDIA	Variação %
MP1	Teor de Alumina	44,5	44,26	-0,54
	Teor de Sílica	48,5	48,51	0,02
	Densidade Aparente	2,63	2,63	0
	Porosidade Aparente	4,75	4,76	0,21
MP2	Teor de Alumina	70,5	70,52	0,03
	Teor de Sílica	22,5	22,45	0,22
	Densidade Aparente	2,95	2,96	0,34
	Porosidade Aparente	3,87	3,8	-1,81
MP3	Teor de Alumina	85	85,17	0,2
	Teor de Sílica	9,5	9,32	-1,89
	Densidade Aparente	3,26	3,27	0,31
	Porosidade Aparente	3,5	3,43	-2

Fonte: O autor.

A partir da análise dos resultados e do processo atual da Magnesita Refratários S.A. pode-se propor uma nova rota alternativa para o consumo das QPTTs, utilizando a dosagem proposta nas matérias-primas conforme mostra o fluxograma da figura 7.

Figura 7 - Fluxograma do processo produtivo em estudo com a rota existente de consumo do reprocessado e da rota alternativa proposta pelo estudo.



Fonte: O autor.

O fluxograma mostra a rota atual, onde as QPTTs são reprocessadas e acondicionadas como matérias-primas em silos específicos e posteriormente são dosadas em algumas marcas específicas. Também é apresentada a rota proposta, onde as QPTTs são reprocessadas e dosadas nas matérias-primas principais, no abastecimento do moinho, de forma que o reprocessado estará presente nos silos das matérias-primas utilizadas na preparação das misturas de todas as marcas. Sendo assim, espera-se aumentar o consumo de QPTTs no processo produtivo considerado.

Considerando-se o período entre março de 2013 e abril de 2014, histórico retroativo de pouco mais de um ano considerando o começo do trabalho, o consumo de QPTTs na rota convencional foi de 240,7 toneladas (resultados obtidos através do histórico de produção disponível no sistema SAP da empresa). Para o mesmo período, considerando apenas a dosagem pela rota proposta, o consumo das QPTTs seria de 368,9 toneladas, considerando 1% da produção total das 3 matérias-primas em estudo.

7. CONCLUSÕES

A partir das variações obtidas a partir da dosagem de 1% e com o estreitamento das faixas de especificações proposto para assegurar a utilização da dosagem mesmo nos limites inferiores e superiores das faixas, pode-se afirmar que a dosagem proposta pode ser efetivamente aplicada no processo produtivo em análise.

Foi possível o estabelecimento de novas faixas de especificações para as matérias-primas, cuja a viabilidade é relevante, pois a comparação entre as faixas atuais e propostas mostra um desvio de menos de 2% entre as médias das mesmas.

Como a rota proposta não altera as especificações originais das matérias-primas, as duas rotas podem ser aplicadas simultaneamente, possibilitando um consumo ainda maior de das QPPTs, o que poderia reduzir significativamente o ICE sem comprometer a qualidade dos produtos. Ressaltando que, no período em análise (março de 2013 e abril de 2014), o aumento do consumo do reprocessado (QPTTs) seria de mais de 150%.

Espera-se dar continuidade a este trabalho verificando a viabilidade da real implementação da rota proposta no processo produtivo considerado, já que os resultados mostraram que a variação foi mínima, não sendo pernicioso para as marcas no que tange a qualidade química e física das mesmas.

Caso a rota seja viabilizada pela companhia, esperasse replicar a mesma metodologia na fábrica de básicos, onde o ganho poderá ser potencialmente maior, por se tratar da fábrica com o volume de produção da Magnesita.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAJO, M.F. **Manual sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos**. Beralmar S. A., Terrassa, 2000, p.193-266.

ABNT NBR 6220. **Materiais refratários densos conformados – Determinação do volume aparente, densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida**, 2011.

ÁLBARO, A. J. L. **A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial parte IV: Extração da peça e resistência mecânica a verde**. Cerâmica Industrial, Março/Abril, 2001.

AMARANTE Jr., A.; BOUTROS, F.A. **Estudo Comparativo dos Métodos do Plasticímetro de Linseis e o Índice de Atterberg na Determinação da Plasticidade de Algumas Argilas do Estado de São Paulo**. Cerâmica. v. 27, n. 135, p. 117-121, 1981.

BANERJEE, Subrata. **Monolithic Refractories – a comprehensive handbook**. Singapore: World Scientific/The American Ceramic Society, 1998. 311p.

BARSOUM, M. **Fundamentals of ceramics**. New York: Taylor & Francis, 2002. 624p.

BELTRAN, V.; FERRANDO, E.; GARCÍA, J.; SÁNCHEZ, E. **Extruded Rustic Floor Tile I. Impact of the Composition on the Body's Behaviour in the Prefiring Process Stages**, Tile & Brick Int. v. 11, n. 3, p. 169-176, 1995.

BERNARDES, R. **Refratários e Isolantes**. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro S.A.-PETROBRAS, 2005. 125p.

BUDNIKOV, P.P. **The Technology of Ceramics and Refractories**. Cambridge: The M.I.T. Press, 1964. 647p.

DUARTE, Alamar Kasan. **Curso: Linha de Produtos em Materiais Refratários**. Belo Horizonte: [s.n.], 2013.

DUARTE, Alamar Kasan. **Curso sobre Fundamentos, Produção e Aplicação de Refratários: Matérias primas.** [S.I.:s.n.], 2004

DUARTE, Alamar Kasan. **Refratários para siderurgia:** Aciaria elétrica. Contagem – MG:Magnesita, 2010. P. 1-16.

EXNER, E. **Principles of Single Phase Sintering, Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics**, 1, 1-4. 1979.

HARPER, Charles. **Handbook of Ceramics, Glasses and Diamonds.** United States: McGraw-Hill, 2001. 929p.

JILLAVENKATESA, A.; DAPKUNAS S. J.; LUM L.H. GOETZEL, G. C. **Particle Size Characterization**, NIST Recommended Practice guide - Special Publication 960-1, Washington, 2001.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 947p.

MAGALHÃES, M. **Efeitos do Ciclo de Queima sobre as Temperaturas de Mínima Absorção de Água e Máxima Densificação de Porcelanatos.** Revista Cerâmica Industrial, v. 19, n. 2, p. 20-25. 2014.

MATOS, José Vale. **Apostila Refratários Básicos.** [S.I.:s.n.], 2009

MATOS, José Vale. **Cominuição: Britagem e Moagem.** [S.I.:s.n.], 2009

MATOS, José Vale. **Homogeneização de Sistemas Particulados.** [S.I.:s.n.], 2006

MATOS, José Vale. **Prensagem: Considerações Técnicas e Aplicação Industrial.** [S.I.:s.n.], 2006

MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron.** Tese (Doutorado em Química) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007.

MUNZ, Dietrich; FETT, Theo. **Ceramics – Mechanical Properties, Failure Behavior, Materials Selection**. Germany: Springer, 1999. 298p.

OLIVEIRA, Ivone Regina et. al. **Dispersão e Empacotamento de Partículas – Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico**. São Paulo: Fazenda Arte, 2000. 195p.

Relação de Investidores – Magnesita. Disponível em: <
<http://ri.magnesita.com/show.aspx?idCanal=oJqMuxJ9qGLCEnjfQbjgPA==>> Acesso em: 17 de julho de 2014.

RICHERSON, D. W. **Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design**. 3. ed. New York: CRC Press, 2005.

SILVA, Wagner Moulin. **Introdução aos Materiais Refratários**. [S.I.:s.n.], 2006.

SILVA, A.G.P., ALVES JUNIOR, C. **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e Sinterizadas por Fluxo Viscoso**. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia. [S.I.:s.n.], 1998.

SKOOG, D.A.; HOLLER, F.J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**, 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, p. 31-36; p. 317-342, 2009.

WELZ, B., SPERLING, M. **Atomic absorption spectrometry**. 3ª ed. Weinheim: Wiley-VCH, 1999.

ZIMMER, A ., BRAGANÇA, S.R., SANTOS, L.A., BERGMANN, C. P. **Comparação entre refratários magnesianos e dolomíticos utilizados em painéis para refino de aço**. Anais do 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica Proceedings of the 48th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society. Curitiba-PR: 2004.