

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LARISSA OTTONI GAMA

IMPLANTAÇÃO DE ENSAIO DE PRENSAGEM DE CORPOS DE PROVA PARA  
REDUÇÃO DE PERDAS NO PROCESSAMENTO DE TIJOLOS REFRAATÓRIOS DE  
MAGNÉSIA-CARBONO

BELO HORIZONTE

2013

LARISSA OTTONI GAMA

IMPLANTAÇÃO DE ENSAIO DE Prensagem de corpos de prova para  
redução de perdas no processamento de tijolos refratários de  
magnésia-carbono

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: Nilton da Silva Maia

Coorientadora: Karina Silva Campos

BELO HORIZONTE  
2013

LARISSA OTTONI GAMA

IMPLANTAÇÃO DE ENSAIO DE PRENSAGEM DE CORPOS DE PROVA PARA  
REDUÇÃO DE PERDAS NO PROCESSAMENTO DE TIJOLOS REFRAATÓRIOS DE  
MAGNÉSIA-CARBONO

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 02/04/2013

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Nilton da Silva Maia (Doutor), CEFET-MG

---

Prof. Karina Silva Campos (Mestre), CEFET-MG

---

Prof. Wanderlei Ferreira de Freitas (Mestre), CEFET-MG

---

Prof. Rachel Mary Osthues (Doutora), CEFET-MG

Dedico este trabalho à minha família querida:  
Papai, Mamãe e Pri, por me ensinarem a não  
desistir dos meus sonhos e pela força, carinho e  
apoio para sempre seguir em frente.

## RESUMO

As novas tecnologias de fabricação do aço aliadas a problemas com preço e concorrência externa têm exigido dos produtores de refratários maior preocupação com qualidade e produtividade. Muitas indústrias vêm se empenhando em implantar sistemas de qualidade que contribuam para aumentar a eficiência do produto e reduzir os custos. O presente trabalho se propôs a implantar um ensaio de prensagem de corpos de prova para liberação de massa refratária de magnésia-carbono da etapa de mistura para a etapa de prensagem de tijolos a partir da densidade volumétrica crua dos corpos de prova, minimizando, assim, paradas de prensas devido a massas fora de especificação, que geram perda de produtividade no processo. Uma vez confeccionados, os corpos de prova após cura seriam utilizados para representar os tijolos na etapa final de controle de qualidade, reduzindo custos com amostragem de produto final para ensaios de liberação. Foram realizados ensaios de densidade volumétrica crua, densidade mássica aparente após cura, porosidade aparente e resistência à compressão à temperatura ambiente. Chegou-se à conclusão de que seria mais interessante buscar outras estratégias de redução de custos e foi verificada a necessidade de se estabelecer um controle mais rígido e padronizado nas etapas anteriores à prensagem, pois isso garantiria a qualidade da massa durante sua conformação e, por conseguinte, o atingimento das propriedades finais.

Palavras-chave: Produtividade. Custos. Prensagem. Corpos de prova. Controle de qualidade. Propriedades finais.

## ABSTRACT

New technologies for manufacturing steel allied to problems with price and foreign competition have required the refractory producers greater concern with quality and productivity. Many industries have been striving in implementing quality systems that help increase product efficiency and reduce costs. This study have proposed to deploy a test pressing of test specimens to release a refractory mass of magnesia-carbon from mixing step to press step based on volumetric green density of the test specimens, thus minimizing stops presses by mass off-specification, which generate lost productivity in the process. Once pressed, the test specimens after cure would be used to represent the bricks in the final step of quality control, reducing costs with sampling of final product for releasing tests. Tests of volumetric green density, bulk density after cure, apparent porosity and cold crushing strength were prepared. It comes to the conclusion that it would be more interesting try other strategies to reduce costs and verified the necessity of establish sterner and more standardized control in the steps before pressing, once they would guarantee the quality of the mass during its conformation and, accordingly, achievement of the final properties.

Keywords: Productivity. Costs. Pressing. Test specimens. Quality control. Final properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura cristalina da magnésia.....	15
Figura 2 – Arranjo das partículas em três tipos de misturas.....	22
Figura 3 – Fluxo de dois materiais durante a mistura e mecanismos de mistura. ....	22
Figura 4 – Misturadores do tipo panela. ....	24
Figura 5 – Prensagem isostática. ....	25
Figura 6 – Tipos de prensagem uniaxial.....	26
Figura 7 – Distribuição não homogênea da pressão de prensagem aplicada nas regiões do molde devido à fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde. ....	26
Figura 8 – Variação do grau de compactação do corpo com a pressão de prensagem. Estágios de compactação. ....	27
Figura 9 – Variação da compactação do corpo em função da pressão de prensagem. ....	28
Figura 10 – Determinação da pressão aparente de fluência ( $P_f$ ) de uma massa cerâmica.....	29
Figura 11 – P/V crus obtidos para os tijolos e corpos de prova .....	38
Figura 12 – P/V cru obtido dos tijolos e corpos de prova em função do tempo de descanso das massas. ....	40
Figura 13 – P/V cru obtido para os tijolos em função do tempo de descanso da massa .....	41
Figura 14 – P/V cru obtido para os corpos de prova em função do tempo de descanso da massa.....	42
Figura 15 – P/V cru X DMA obtidos para os tijolos e corpos de prova.....	43
Figura 16 – RCTA obtido para os tijolos e corpos de prova .....	44
Figura 17 – PA obtida para os tijolos e corpos de prova.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos diferentes tipos de magnésia .....	16
Tabela 2 – Principais reações e características dos antioxidantes .....	18
Tabela 3 – Estágios de britagem.....	20
Tabela 4 – Resultados de DMA e PA da magnésia eletrofundida.....	37
Tabela 5 – P/V cru obtido para cada massa.....	38
Tabela 6 – Tempos de descanso realizados .....	39
Tabela 7 – Cálculo de mão-de-obra necessária .....	46
Tabela 8 – Aumento do quadro de pessoal necessário .....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DMA	Densidade mássica aparente (após cura)
HMTA	Hexametenotetramina
MgO-C	Magnésia-carbono
Mw	Massa molar média
P/V cru	Densidade volumétrica crua (antes da cura)
PA	Porosidade aparente
P <sub>f</sub>	Pressão aparente de fluência do grânulo
P <sub>O<sub>2</sub></sub>	Pressão parcial de O <sub>2</sub>
RCTA	Resistência à compressão à temperatura ambiente
ρ	Compactação do corpo
ρ <sub>G</sub>	Compactação do grânulo

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Matérias primas refratárias.....	15
3.1.1	<i>Magnésia</i> .....	15
3.1.2	<i>Grafita</i> .....	16
3.1.3	<i>Antioxidantes</i> .....	17
3.1.4	<i>Ligante</i> .....	18
3.2	Processamento de refratários.....	20
3.2.1	<i>Britagem e moagem</i> .....	20
3.2.2	<i>Mistura</i> .....	21
3.2.3	<i>Descanso da mistura</i> .....	24
3.2.4	<i>Prensagem</i> .....	24
3.2.5	<i>Tratamento térmico</i> .....	31
3.3	Aplicações de tijolos de MgO-C.....	32

4	METODOLOGIA.....	33
4.1	Confecção dos corpos de prova e tijolos .....	33
4.1.1	<i>Preparação das massas</i> .....	33
4.1.2	<i>Descanso das massas</i> .....	33
4.1.3	<i>Amostragem das massas</i> .....	33
4.1.4	<i>Prensagem das amostras</i> .....	34
4.1.5	<i>Cura dos corpos de prova e tijolos</i> .....	34
4.2	Técnicas de caracterização .....	34
4.2.1	<i>Caracterização física da magnésia eletrofundida</i> .....	34
4.2.2	<i>Análise granulométrica das massas</i> .....	34
4.2.3	<i>Medição do P/V cru dos corpos de prova e tijolos</i> .....	35
4.2.4	<i>Caracterização físico-mecânica dos corpos de prova e tijolos</i> .....	35
4.3	Cálculo de mão-de-obra necessária à implantação do ensaio.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5.1	Caracterização física da magnésia eletrofundida.....	37
5.2	Análise granulométrica das massas .....	37
5.3	P/V cru obtido para os corpos de prova e tijolos.....	37
5.4	Tempo de descanso realizado .....	39

5.5	Densidade mássica aparente (DMA) .....	42
5.6	Resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) .....	44
5.7	Porosidade aparente (PA) .....	45
5.8	Mão-de-obra necessária à implantação do ensaio .....	46
6	CONCLUSÃO .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

Refratários são materiais não metálicos, moldados ou monolíticos, capazes de resistir a altas temperaturas, mantendo suas propriedades, tais como: resistência mecânica, resistência a choques térmicos e a ciclos térmicos, resistência à abrasão, erosão e corrosão por metais líquidos, vidro, escória e gases quentes. São utilizados em indústrias siderúrgicas, cimenteiras, de vidro, não-ferrosos e indústrias químicas em geral que utilizem processos em alta temperatura (MATOS JUNIOR, 2006 d).

Os refratários de magnésia-carbono (MgO-C) têm excelente resistência a escórias e ao choque térmico, devido às propriedades do carbono. São amplamente utilizados em fornos elétricos a arco, fornos básicos a oxigênio, linhas de escória de painéis de aço. Também são muito utilizados em convertedores, os quais apresentam maior severidade na operação (CAMPOS, 2011).

O desenvolvimento da indústria siderúrgica para a produção de aços mais limpos e com maior número de elementos de liga, somado ao aumento na proporção do lingotamento contínuo resultou em um aumento nas temperaturas de operação. A introdução de diferentes processos de sopro de gases promove intensa movimentação do banho líquido, levando a solicitações termomecânicas e físico-químicas bem elevadas. Com isso, os produtores de refratários passaram a oferecer produtos que atendam aos requisitos impostos pelas novas tecnologias de fabricação do aço (CAMPOS, 2011).

A siderurgia consome cerca de 70% da produção de refratários e os compradores agora exigem mais dos refrataristas, que enfrentam alguns problemas sérios com preço e concorrência externa, razão pela qual estão todos preocupados com qualidade e produtividade.

Muitas indústrias vêm se empenhando em implantar sistemas de qualidade que contribuam para aumentar a eficiência do produto e reduzir os custos (BUSTAMANTE, 2000).

O processo geral de produção dos tijolos refratários de MgO-C envolve cinco etapas: britagem, moagem, mistura, prensagem e cura. A britagem e a moagem visam produzir as matérias primas em diferentes frações granulométricas. Na mistura, cada tipo e fração de matéria prima é dosado em diferentes quantidades e misturado, produzindo uma massa

homogênea. Em seguida, é realizada a prensagem, que confere forma à massa, compactando-a. Por fim, realiza-se a cura, que tem como objetivo promover a polimerização da resina, conferindo, assim, maior resistência mecânica ao tijolo (MATOS JUNIOR, 2006 d).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho teve como objetivo inicial realizar um estudo comparativo de propriedades intermediárias e finais de tijolos e corpos de prova conformados por prensagem de uma massa refratária de MgO-C em prensas diferentes.

### **2.2 Objetivos específicos**

O primeiro objetivo específico foi definir, a partir deste estudo e da análise de mão-de-obra necessária, a viabilidade de implantação de ensaio de prensagem de corpos de prova para liberação de massa refratária de MgO-C da etapa de mistura para a etapa de prensagem de tijolos a partir da densidade volumétrica crua ( $P/V$  cru<sup>1</sup>) dos corpos de prova. A implantação deste ensaio minimizaria paradas de prensas devido a massas fora de especificação, que geram perda de produtividade do processo, uma vez que, a partir do  $P/V$  cru obtido para o corpo de prova, definir-se-ia por utilizar ou refugar a massa.

O segundo objetivo específico foi definir a viabilidade de se utilizar os corpos de prova após cura para representarem os tijolos na etapa final de controle de qualidade, reduzindo custos com amostragem de produto final para ensaios de liberação (caracterização física).

---

<sup>1</sup>  $P/V$  cru é um termo comumente utilizado na empresa e refere-se à densidade volumétrica medida antes da cura. Será utilizado ao longo deste trabalho e é calculado dividindo-se a massa do tijolo (em gramas) pelo volume (em centímetros cúbicos) da peça.

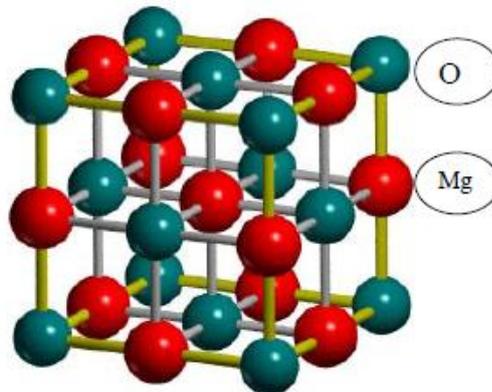
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Matérias primas refratárias

##### 3.1.1 Magnésia

A magnésia (MgO), é a principal matéria-prima presente nos tijolos de MgO-C, totalizando um valor igual ou superior a 80% da composição total. Existem três tipos de magnésias, que se diferem pela forma de obtenção, pureza e, conseqüentemente, propriedades. A magnésia sinterizada, também denominada sínter de magnésia, é derivada do mineral magnesita ( $MgCO_3$ ). A magnésia derivada da água do mar é produzida por meio da queima em alta temperatura do hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ) extraído da água. Por fim, tem-se a magnésia eletrofundida, que é obtida pela fusão de alguma das anteriores em fornos elétricos (BAG, 2011). A Figura 1 apresenta a estrutura cristalina do MgO, que é do tipo [Sal-Gema].

Figura 1– Estrutura cristalina da magnésia



Fonte: BAG , 2011.

Diversos estudos foram feitos acerca dos efeitos da magnésia nos tijolos de MgO-C e indicaram que, para maior resistência à corrosão e abrasão, são necessários:

- (a) agregados com alta concentração de MgO;
- (b) agregados com baixo percentual de  $B_2O_3$ ;
- (c) agregados com uma alta razão de  $CaO/SiO_2$ ;
- (d) grãos de periclásio ( $MgCO_3$ ) com grande tamanho de cristal.

Para a mesma composição química, a magnésia eletrofundida irá propiciar a maior resistência à corrosão (ANDOH, 1998). Isso é devido ao maior tamanho de cristal, que diminui a extensão ocupada pelos contornos de grão (BAG, 2011). A Tabela 1 apresenta um comparativo de propriedades dos diferentes tipos de magnésia.

**Tabela 1 – Propriedades dos diferentes tipos de magnésia**

Propriedades	Tipos de Magnésia				
	Proveniente da água do mar		Proveniente da Magnesita		
	Eletrofundida	Sinterizada	Eletrofundida	Sinterizada	
Composição química (%)	MgO	99,02	99,14	96,56	98,22
	SiO <sub>2</sub>	0,22	0,23	1,29	0,57
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,06	0,12	0,08
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	0,04	0,75	0,44
	CaO	0,57	0,51	1,19	0,58
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,04	Traços	Traços
Porosidade aparente (%)	2,6	1,5	1,1	0,8	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,46	3,4	3,54	3,55	
Tamanho de cristal (µm)	> 200	20-40	> 50	> 100	

Fonte: BAG, 2011.

### 3.1.2 Grafita

A grafita é uma forma alotrópica do carbono, de estrutura hexagonal e de cor escura. Dentre todas as formas comerciais do carbono, é a que apresenta maior resistência à oxidação (BAG,2011).

Existem dois tipos de grafita utilizados industrialmente, a sintética e a natural. A sintética tem custo elevado e destina-se a aplicações especiais, sendo a natural a mais utilizada na produção de refratários. A grafita natural subdivide-se em três tipos distintos: microcristalina ou amorfa, cristalina e *flake*. A *flake* é a que apresenta melhor desempenho em materiais refratários (BONADIA NETO, 2009).

A adição de carbono aos refratários garante ao tijolo maior condutividade térmica, maior energia de fratura, melhor resistência ao dano por choque térmico e aumento da resistência ao ataque por escória em função da baixa molhabilidade por óxidos fundidos (PANDOLFELLI, 2007). Teores maiores de carbono resultam em maior compressibilidade durante a prensagem, conferindo menor porosidade. Em altas temperaturas, este efeito é reduzido, devido à expansão irreversível da grafita (BAG, 2011).

Apesar das boas propriedades adicionais, a incorporação de carbono reduz a resistência à oxidação em elevadas temperaturas, tendo como consequência imediata a redução da resistência mecânica devido ao aumento da porosidade, facilitando a penetração de ar e escória, o que intensifica a deterioração do tijolo refratário. Uma solução para isso seria o uso de antioxidantes, substâncias que reagem preferencialmente com o oxigênio, diminuindo sua velocidade de consumo ou taxa de oxidação. Além disso, alguns dos produtos gerados pelas reações com os antioxidantes sofrem expansão volumétrica, diminuindo a porosidade do sistema e, conseqüentemente, a permeabilidade e difusão do oxigênio no refratário (PANDOLFELLI, 2007).

### 3.1.3 Antioxidantes

Os pós de alumínio, magnésio, silício e suas ligas são muito utilizados como antioxidantes devido ao baixo custo e proteção efetiva, através da melhoria na resistência à oxidação de materiais refratários que contém carbono. Cada antioxidante atua em diferentes faixas de temperatura, sendo comum utilizar-se mais de um tipo para complementar a ação destes materiais (PANDOLFELLI, 2007).

A oxidação direta do carbono com o oxigênio gasoso ( $O_2$ ) tem início entre 400 e 1200°C e  $PO_2 \geq 10^{-4}$  atm (equação 1). Em temperaturas acima de 1400°C o carbono passa a reagir com óxidos sólidos ou líquidos ou sub-óxidos gasosos presentes no sistema (PANDOLFELLI, 2007). O carbono também pode ser oxidado pelo  $CO_2$  (ANDOH, 1998).



Há um consenso, na literatura, de que há uma quantidade ótima de alumínio (Al) e silício (Si) a serem adicionados. Ambos possuem reações intermediárias diferentes e ocorrem em

diferentes faixas de temperatura (PANDOLFELLI, 2007). A Tabela 2 apresenta as principais reações e características dos pós de Al e Si.

**Tabela 2 – Principais reações e características dos antioxidantes**

Alumínio (Al)	$2\text{Al}_{(l)} + 3\text{CO}_{(g)} = \text{Al}_2\text{O}_{3(s)} + 3\text{C}_{(s)} \text{ (660}^\circ\text{C)}$
	Aumenta a resistência em alta temperatura. Há um problema de hidratação se houver formação de carbeto de alumínio ( $\text{Al}_4\text{C}_3$ ).
Silício (Si)	$\text{Si}_{(s)} + \text{C}_{(s)} = \text{SiC}_{(s)} \text{ (~1200}^\circ\text{C)}$
	$\text{SiC}_{(s)} + 2\text{CO}_{(g)} = \text{SiO}_{2(s)} + 3\text{C}_{(s)}$ Frequentemente utilizado juntamente ao Alumínio, retardando a hidratação do $\text{Al}_4\text{C}_3$ .

Fonte: ANDOH, 1998.

Todo antioxidante reage com o monóxido de carbono (CO), formando um óxido e carbono. O pó de alumínio irá formar compostos intermediários com o carbono e nitrogênio e, por fim, formar  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Essa reação gera expansão volumétrica, reduzindo a porosidade da estrutura e a entrada de CO, prevenindo a oxidação do carbono. Além disso, a adição de Al leva à formação de  $\text{Al}_4\text{C}_3$  e AlN, que aumentam a refratariedade do tijolo. Entretanto, a fase  $\text{Al}_4\text{C}_3$  é facilmente hidratada em temperatura ambiente, podendo gerar trincas e quebras no revestimento. O pó de silício reduz a oxidação pelo mesmo mecanismo do alumínio: redução do monóxido de carbono. Do ponto de vista termodinâmico, a partir de  $1525^\circ\text{C}$ , em atmosfera de CO, o SiC é mais estável do que o  $\text{SiO}_2$ , tornando o pó de Si, quando usado sozinho, ineficaz como antioxidante. Entretanto, quando usado em conjunto com o Al, além de tornar o refratário mais resistente à oxidação, ajuda a controlar a hidratação do  $\text{Al}_4\text{C}_3$  (ANDOH, 1998).

### 3.1.4 Ligante

Um dos componentes necessários à fabricação de refratários é o ligante. As funções principais de um ligante para as matérias primas são umedecer os grãos, garantindo a plasticidade

necessária para prensagem, fornecer resistência a verde (antes da cura) ao tijolo e elevar a resistência mecânica após a cura (MATOS JUNIOR, 2006 d).

Durante muito tempo, o ligante utilizado para a fabricação de refratários era o piche. Nos refratários compostos por alto percentual de grafita era difícil produzir um tijolo denso, uma vez que o caráter elástico da grafita causava expansão do tijolo durante a cura, devido à sua má aderência com a matriz. O piche então foi substituído pela resina fenólica, que, além de ser ambientalmente menos prejudicial, possui afinidade química com a grafita e os outros constituintes, facilitando sua dispersão, é termofixa, resultando em mínima variação dimensional após a cura e suas propriedades adesivas aumentam a resistência do tijolo (ANDOH, 1998). A resina representa também uma fonte de carbono que irá formar ligações com o carbono presente na matriz (MATOS JUNIOR, 2006 d). Além disso, resinas líquidas também controlam a umidade dos tijolos refratários e podem influenciar diretamente em sua qualidade (PAGLIOSA NETO, 2004).

Resinas fenólicas são obtidas a partir da reação entre fenóis e formaldeídos, podendo formar, de acordo com o percentual fenol-formaldeído, a Novolaca e a Resol. A Novolaca possui maior percentual de formaldeído e maior peso molecular do que a Resol. Sendo assim, não reage somente pelo aquecimento, necessitando da adição de um composto para promover sua polimerização ou cura, como o hexametilenotetramina (HMTA). A Resol possui maior percentual de fenol e sua cura ocorre por meio de reações de condensação, podendo ser promovida por ácidos, bases, sais ou pelo aquecimento (PAGLIOSA NETO, 2004).

Uma característica importante a se avaliar em resinas é a viscosidade. A viscosidade desejada para utilização em refratários de MgO-C é de 8000 cps a 25°C. No inverno, a baixa temperatura resulta em uma resina mais viscosa, dificultando sua dispersão na mistura. No verão, sua viscosidade diminui, podendo gerar laminação nos tijolos. A menor viscosidade da Resol e menor percentual de voláteis resulta em tijolos com menor porosidade após cura (BAG, 2011).

## 3.2 Processamento de refratários

### 3.2.1 Britagem e moagem

A britagem e moagem são processos de cominuição largamente utilizados para reduzir o tamanho médio de partículas do material, liberar impurezas e reduzir a porosidade das partículas, modificar sua distribuição granulométrica, dispersar aglomerados e agregados, aumentar o percentual de colóides e modificar o formato das partículas (REED, 1988).

O controle da distribuição do tamanho de partículas é necessário para que o tijolo atinja as propriedades desejadas para as aplicações específicas. É essencial para promover alta densidade, baixa porosidade e baixa permeabilidade. Além disso, contribui para um melhor módulo de elasticidade e maior resistência mecânica (MATOS JUNIOR, 2006 a).

A britagem é uma etapa de classificação grosseira, podendo ser utilizada em blocos de minérios, para liberar o material de interesse das outras impurezas e também para diminuir o tamanho de partícula até que se atinja o tamanho desejado, seja ele para uso direto ou posterior processamento. Pode ser dividida, de acordo com o tamanho de partícula do material alimentado no britador e o tamanho final atingido, em: primária, secundária, terciária e quaternária, sendo a quaternária, em geral, substituída pela moagem. A Tabela 3 apresenta os diferentes tipos de britagem.

**Tabela 3 – 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 quaternária	5	0,8

Fonte: Magnesita Refratários S.A.

Os equipamentos mais comumente utilizados na britagem são o britador de mandíbulas e o britador giratório. Ambos promovem a britagem pelo método da compressão, que gera

partículas grossas, resultantes da quebra induzida por tensão e partículas finas, resultantes da compressão no local em que a carga é aplicada. O britador de mandíbulas é utilizado para britagem primária. Possui mecanismo e manutenção simples e boa capacidade de britagem. Não é recomendado para materiais muito duros ou muito dúcteis. O britador giratório possui praticamente o dobro da capacidade do de mandíbulas. O tamanho de partícula do material alimentado é quase a metade do alimentado no de mandíbulas. Ambos os produtos gerados possuem formatos similares (ANDOH, 1998).

A moagem destina-se à produção de partículas mais finas e é realizada após a britagem. Os equipamentos mais utilizados são moinhos de rolos, britadores de impacto, moinhos de bolas e vibratórios (ANDOH, 1998).

Os moinhos de rolos promovem a moagem por compressão, gerando menor quantidade de material fino e produtos de formato plano e alongado. Os britadores de impacto e moinhos de bolas promovem a moagem por impacto. Os britadores de impacto podem possuir eixo horizontal ou vertical de rotação. São os mais comuns utilizados para moagem intermediária de matérias primas refratárias. Possuem alta taxa de moagem, manutenção simples e relativo baixo custo inicial. Os moinhos de bolas são utilizados para produzir grãos ultrafinos. As bolas utilizadas geralmente são feitas de alumina, pois bolas de aço podem contaminar o material moído com ferro, devido ao desgaste. Os moinhos vibratórios realizam a moagem por impacto e atrito, produzindo partículas ultrafinas, na dimensão de micrometros ou menores. Se comparado a moinhos de bolas, o moinho vibratório possui menor produtividade (ANDOH, 1998).

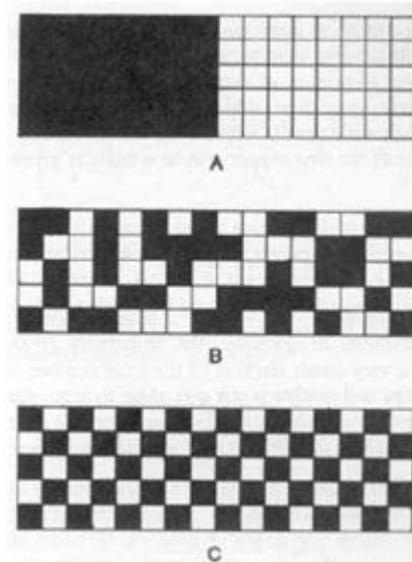
Após a etapa de cominuição, o material é classificado por peneiras, de acordo com sua granulometria, e estocado em silos ou *bags*, para posteriormente ser utilizado na mistura (MATOS JUNIOR, 2006 a).

### **3.2.2 Mistura**

A etapa de mistura consiste em uma operação mecânica que tem como objetivo misturar, distribuir, dispersar e promover a uniformização química e física da mistura. Não existe mistura completamente homogênea. Uma mistura pode ser considerada homogênea quando sua composição não varia com a posição de retirada da amostra. Durante esse processo, a

segregação mínima e máxima homogeneidade são obtidas somente quando os aglomerados e aditivos estão bem dispersados (REED, 1988). A Figura 2 apresenta o arranjo das partículas em três tipos diferentes de mistura.

**Figura 2 – Arranjo das partículas em três tipos de misturas.**



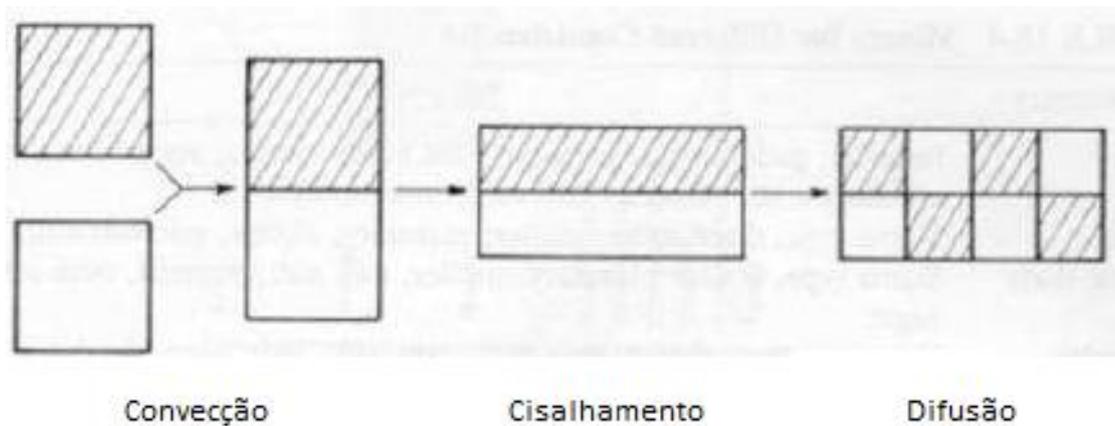
**(A) completamente segregadas (B) completamente aleatórias (C) completamente dispersas.**

Fonte: REED , 1988.

Como há muitas variáveis no processo, é inviável a produção industrial de uma mistura completamente dispersa, como apresentado na Figura 2. Sendo assim, uma mistura ideal é aquela em que os componentes estão distribuídos de forma completamente aleatória (REED, 1988).

Os mecanismos que promovem a mistura são convecção, cisalhamento e difusão. A convecção é a transferência dos componentes de uma região para a outra. O cisalhamento aumenta a interface entre os componentes por deformação. A difusão altera a posição de moléculas e partículas aleatoriamente entre regiões vizinhas da mistura (REED, 1988). Os três mecanismos são apresentados na Figura 3.

**Figura 3 – Fluxo de dois materiais durante a mistura e mecanismos de mistura.**

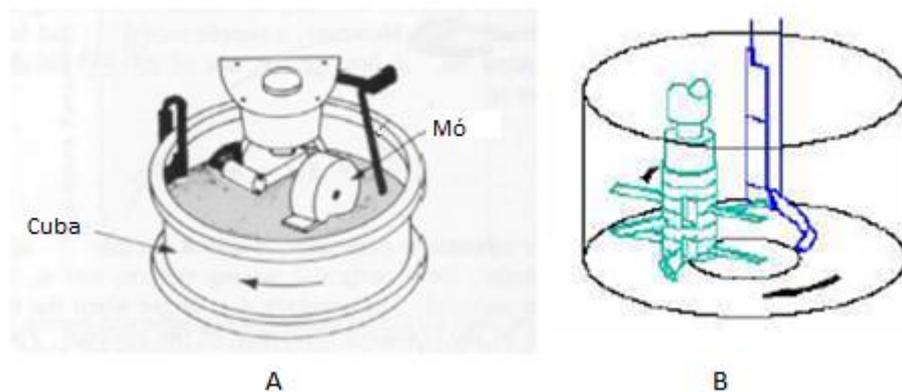


Fonte: REED , 1988.

A importância relativa de cada mecanismo de mistura depende do projeto do misturador, da consistência e reologia do material e da energia aplicada no processo de mistura. O fluxo produzido pelos dispositivos de alimentação, mistura e dispersão, contribuem para a convecção. Superfícies do misturador em diferentes velocidades irão promover um gradiente de tensões de cisalhamento, se não houver derrapagem. Intensas tensões de cisalhamento dispersam os aglomerados e misturam os materiais viscosos em uma microescala. Cavitação, impacto e vibrações sonoras geram turbulências, que dispersam os aglomerados e aceleram a mistura por difusão.

As variáveis que geram segregação da mistura são as características do material misturado, o tipo de misturador utilizado e o manuseio da mistura para processos posteriores. Um tipo de misturador comumente utilizado para refratários que serão moldados é o tipo panela, que consiste em uma cuba cilíndrica, fixa ou móvel, com um eixo vertical, em que ficam presas as mós (misturador de mós) ou o agitador, que possui palhetas ou dentes e gira durante o processo (misturador de alta intensidade) (MATOS JUNIOR, 2006 b). A Figura 4 apresenta os dois tipos de misturadores do tipo panela.

**Figura 4 – Misturadores do tipo panela.**



**(A) misturador de mós e (B) misturador de alta intensidade**

Fonte: Magnesita Refratários S.A.

### **3.2.3 Descanso da mistura**

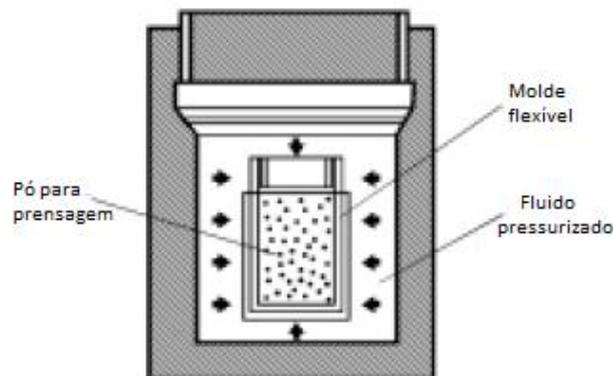
O tempo decorrido entre o término da preparação da mistura e o início de sua prensagem é primordial para a obtenção de uma boa plasticidade da massa. Para massas ligadas à resina, é necessário o atendimento de um tempo mínimo de descanso, para que a massa possa reduzir a temperatura adquirida durante o processo de mistura, bem como a resina aumentar a sua viscosidade, proporcionando então à massa uma melhor plasticidade para prensagem (MATOS JUNIOR, 2006 d).

### **3.2.4 Prensagem**

A prensagem é uma etapa que promove simultaneamente a compactação e conformação de um material granulado confinado em uma matriz rígida ou molde flexível (REED, 1988). É um processo amplamente utilizado na indústria cerâmica devido à sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de diferentes tamanhos e formatos, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional. Existem dois tipos diferentes de prensagem: isostática e uniaxial (ALBARO, 2001).

Na prensagem isostática, a compactação do pó ocorre no interior de um molde flexível, sobre o qual atua um fluido pressurizado, garantido uma distribuição de pressão homogênea. É ideal para peças complexas, que apresentem relevo em duas ou mais dimensões ou no caso de tubos e barras, em que uma dimensão é muito maior que as demais (ALBARO, 2001). A Figura 5 apresenta a prensagem isostática.

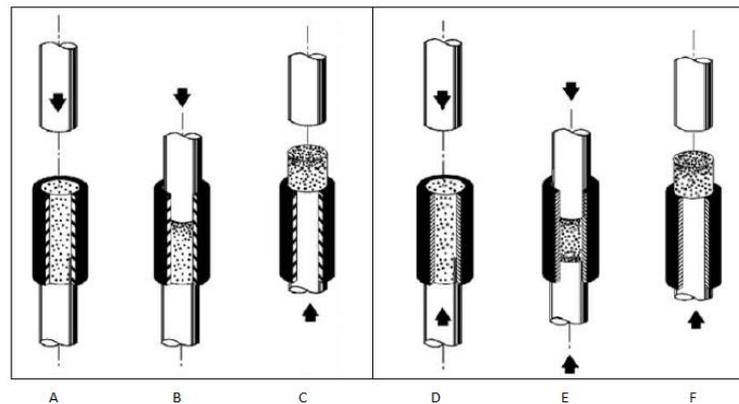
**Figura 5 – Prensagem isostática.**



Fonte: ALBARO , 2001.

Na prensagem uniaxial a compactação do pó é feita em matriz rígida, aplicando-se pressão na direção axial, através de punções rígidas. É adequada para peças que não possuem relevo superficial na direção de prensagem. Pode ser realizada de duas formas: com ação simples e ação dupla. Na ação simples, a carga é aplicada em apenas um sentido e é adequada para peças de baixa espessura. Na prensagem de ação dupla, a prensagem é feita em dois sentidos, para garantir maior uniformidade de compactação, e é a ideal para peças espessas e de geometria complexa (ALBARO, 2001). A Figura 6 apresenta os mecanismos de prensagem uniaxial.

**Figura 6 – Tipos de prensagem uniaxial.**

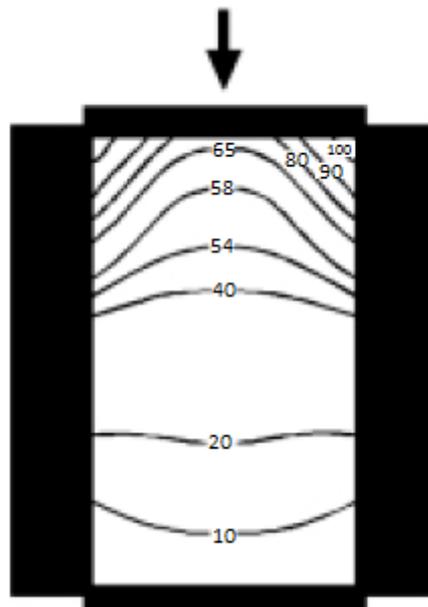


**(A), (B) e (C) ação simples e (D), (E) e (F) ação dupla.**

Fonte: ALBARO, 2001.

Ao contrário do que ocorre na prensagem isostática, os corpos conformados uniaxialmente apresentam gradientes de densidade. Isso ocorre devido à fricção entre as partículas do pó e o molde e a fricção entre elas, as quais impedem a transmissão integral e uniforme da pressão a todas as regiões da peça, como apresentado na Figura 7 (ALBARO, 2001).

**Figura 7 – Distribuição não homogênea da pressão de prensagem aplicada nas regiões do molde devido à fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde.**



Fonte: ALBARO, 2001.

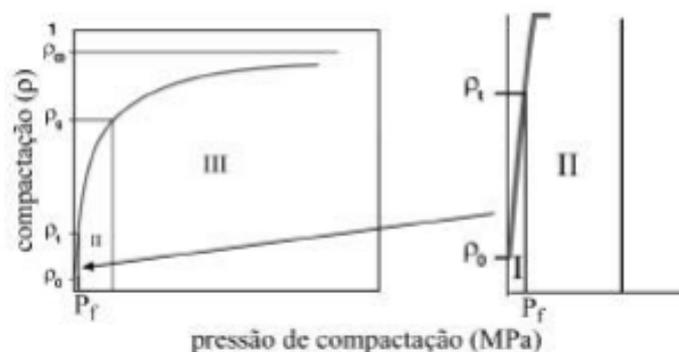
Os objetivos da operação de prensagem são obter peças uniformes, de acordo com a geometria e dimensões pré-estabelecidas e obter uma microestrutura que garanta as características finais desejadas, assim como em qualquer técnica de conformação.

As etapas anteriores irão influenciar a prensagem e as características microestruturais da peça a verde obtida, sendo necessário tratá-las como uma sequência de etapas integradas, que, deliberadamente e de forma sistemática, transformam uma formulação em produto acabado, passando por diversos produtos intermediários. Alguns fatores que influenciam são: a seleção e dosagem das matérias primas e suas características microestruturais, distribuição de tamanho de partículas, forma e textura dos grânulos ou aglomerados, técnica de preparação da massa, dentre outras. Sendo assim, tanto a prensagem quanto as outras etapas devem ser realizadas de forma a permitir à peça verde resistência mecânica para suportar solicitações como secagem, decoração, transporte, armazenagem, queima e permeabilidade suficiente para permitir, no tempo adequado, a ocorrência de reações que envolvam troca de gases durante o aquecimento. Além disso, devem conferir ao produto final as características microestruturais desejadas, como porosidade, distribuição de tamanho de poros, tamanho de grão, que irão determinar as características técnicas da peça, como resistência mecânica (ALBARO, 2001).

#### 3.2.4.1 Estágios de compactação

A compactação de um material granulado pode ser dividida em três estágios de compactação, conforme apresentado na Figura 8.

**Figura 8 – Variação do grau de compactação do corpo com a pressão de prensagem. Estágios de compactação.**



**(I) estágio inicial (II) estágio intermediário e (III) estágio final.**

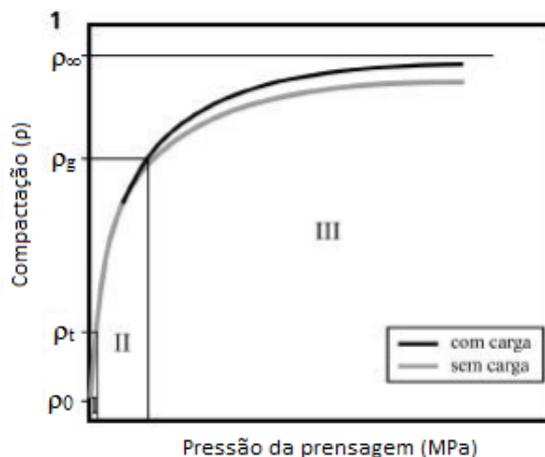
Fonte: ALBARO, 2001.

O estágio inicial (I) compreende desde o início da prensagem até o valor de pressão, denominado pressão aparente de fluência do grânulo ( $P_f$ ), em que os grânulos atingem grau máximo de empacotamento sem que ocorra sua deformação ou destruição. O mecanismo predominante é o de deslizamento e reordenação dos grânulos. Apesar do efeito da pressão na densificação da peça ser grande nesse estágio, a compactação do corpo ( $\rho$ ) é aumentada ligeiramente, de seu valor  $\rho_0$  até  $\rho_t$ .

O estágio intermediário (II) se estende desde  $P_f$  até o valor de pressão na qual a compactação do corpo coincide com a do grânulo ( $\rho_G$ ). Nesse estágio ocorre a maior compactação no corpo, através do mecanismo de redução do volume e tamanho dos espaços intergranulares devido à deformação plástica e/ou destruição dos grânulos, podendo ocorrer também esmagamento de grânulos ociosos. Ocorre redução da porosidade intergranular, sendo que a intragranular permanece inalterada.

O estágio final (III) ocorre a partir do momento em que a compactação do corpo se iguala a  $\rho_G$ , ponto em que, teoricamente, desaparece toda a porosidade intergranular. Sendo assim, o aumento da compactação nesse estágio só pode ocorrer devido ao mecanismo de deslizamento e reordenação das partículas, reduzindo o volume e tamanho dos poros intragranulares. Nesse estágio ocorre, relativamente, pouca densificação, sendo que a maior parte da carga aplicada provoca compressão elástica do material, que se armazena sob a forma de energia elástica, vindo a ser liberada com a retirada da carga, conforme Figura 9 (ALBARO, 2001).

**Figura 9 – Variação da compactação do corpo em função da pressão de prensagem.**



Fonte: ALBARO, 2001.

A compactação final da peça é, de uma forma geral, sempre inferior à compactação correspondente ao empacotamento mais denso possível das partículas, devido aos seguintes fatores:

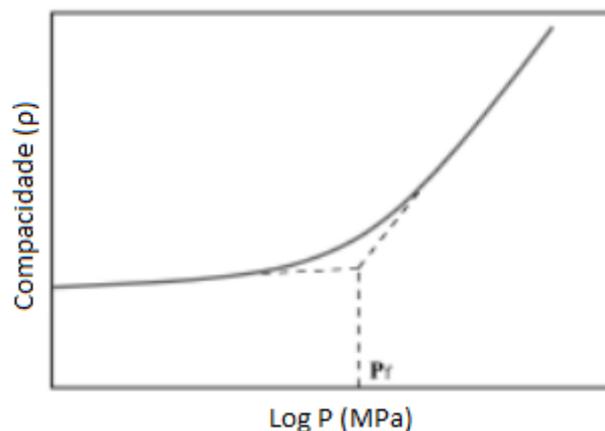
- (i) formação de empacotamentos irregulares e porosos de partículas duras e frágeis que resistiram às altas pressões, que possuem altas forças de fricção entre si;
- (ii) se o conteúdo de ligantes e plastificantes for elevado, em altas pressões pode haver saturação dos poros da peça, impedindo a compactação.

Os intervalos de pressão em que atuam os mecanismos não estão claramente definidos, sendo frequente a existência simultânea de dois dos três mecanismos evidenciados nos estágios.

#### 3.2.4.2 Variáveis do processo de compactação

O parâmetro comumente utilizado como característico do comportamento mecânico dos grânulos é  $P_f$ , que representa o valor de pressão a partir do qual os grânulos começam a se romper ou sofrer deformação plástica. Para se calcular  $P_f$ , representa-se graficamente a compacidade em função do logaritmo da pressão, obtendo-se duas regiões lineares no gráfico. A interseção do prolongamento destes dois segmentos de reta determina  $P_f$  (Figura 10). Experimentalmente e teoricamente foi comprovado que a pressão de fluência está diretamente ligada com a resistência mecânica à compressão do grânulo (ALBARO, 2001).

**Figura 10 – Determinação da pressão aparente de fluência ( $P_f$ ) de uma massa cerâmica.**



Fonte: ALBARO, 2001.

#### 3.2.4.2.1 Compacidade do grânulo ( $\rho_G$ )

Quanto maior  $\rho_G$ , maior  $P_f$ , tornando mais difícil eliminar os poros inter e intragranulares da massa. Sendo assim, para uma mesma pressão de prensagem, quanto mais denso for o grânulo, menor o grau de avanço da compactação da massa devido à eliminação desses poros. Por outro lado, quanto mais compactos forem os grânulos, maior a compacidade da massa (ALBARO, 2001).

Em casos de grânulos muito densos e também muito resistentes à deformação ( $P_f$  muito alto), por exemplo, quando há baixo conteúdo de plastificante, em pressões habituais de prensagem os poros intergranulares não são totalmente eliminados, sendo possível observar na peça conformada grânulos não totalmente deformados e poros grandes. Ambos irão afetar na resistência mecânica da peça a verde e após tratamento térmico. Em casos desse tipo a densidade da peça prensada  $\rho$  é inferior à densidade dos grânulos  $\rho_G$  (ALBARO, 2001).

#### 3.2.4.2.2 Tamanho médio e distribuição de tamanhos

Em baixas pressões de prensagem, sobretudo com massas com baixo teor de plastificante, a utilização de grânulos maiores gera uma compacidade mais elevada, uma vez que apresentam menor  $P_f$ . Quando o teor de plastificante e a pressão de prensagem são reduzidos, a peça apresentará poros intergranulares e a menos heterogênea será aquela que possui grânulos mais finos, pois o tamanho dos poros intergranulares será menor também. Quando o teor de plastificante for alto e as pressões forem as habituais de prensagem, o efeito do tamanho médio e da distribuição de tamanho dos grânulos será desprezível (ALBARO, 2001).

#### 3.2.4.2.3 Estrutura dos aglomerados

Quando o teor de plastificante é reduzido e a pressão de prensagem é baixa, não ocorre deformação completa do grânulo. Para uma mesma pressão de prensagem, a massa composta por grânulos ocos sofrerá maior deformação do que a composta por grânulos maciços, uma vez que os ocos têm menor resistência à deformação (menor  $P_f$ ). Entretanto, a compacidade da massa composta de grânulos ocos é menor. Para valores habituais de pressão de prensagem, quando há elevado teor de plastificante, os grânulos se deformam completamente,

não sendo observadas nas massas compostas por grânulos ocos ou maciços diferenças na microestrutura resultante e compacidade das peças (ALBARO, 2001).

#### *3.2.4.3 Equipamentos de prensagem*

Existem diferentes tipos de prensas, que são os equipamentos que realizam a prensagem. As prensas mais utilizadas são as de fricção ou as hidráulicas (MATOS JUNIOR, 2006 c).

As prensas de fricção operam por ação simples. A sapata que movimenta é a superior, enquanto a inferior é fixa. Atinge altas pressões, uma vez que seu mecanismo de prensagem é por impacto. Isso resulta em elevada compactação, boa uniformidade, baixo custo de manutenção e baixa produtividade. É utilizada para produzir peças maiores e produz tijolos com maior densidade se comparada às prensas hidráulicas (MATOS JUNIOR, 2006 c).

As prensas hidráulicas também operam por ação simples, com movimentação da sapata superior. O enchimento do molde é mais uniforme, há possibilidade de ajustar a velocidade de prensagem, possuem sistemas de desaeração, que retiram o ar contido no material a ser prensado. Permitem prensar mais de um tijolo por vez, sendo, assim, de alta produtividade. No entanto, neste caso, a mesma pressão é dividida pela área de cada tijolo e, por isso, as densidades alcançadas são menores. É utilizada, em geral, para tijolos de menor complexidade e menores (MATOS JUNIOR, 2006 c).

A escolha do tipo de prensagem e do tipo de equipamento deve ser avaliada de acordo com o tipo de material a ser prensado, o tamanho do lote que se deseja produzir e o prazo de entrega e as propriedades finais desejadas (MATOS JUNIOR, 2006 c).

#### *3.2.5 Tratamento térmico*

A resina Resol é rapidamente curada por ácido, base, sais ou pelo aquecimento. O método mais utilizado para promover sua cura na indústria refratária é por tratamento térmico. A Resol é termofixa, necessitando de temperaturas acima de 100°C para formar uma resina rígida e insolúvel (PAGLIOSA NETO, 2004).

Assim que a cura da Resol se inicia, sua massa molar média ( $M_w$ ) aumenta, levando à formação de um gel, tornando-a insolúvel no solvente (água ou álcool). Durante o aquecimento, enquanto ocorre volatilização do solvente, a flexível resina fenólica intermediária tem seu módulo de elasticidade aumentado, tornando-se rígida e reticulada. A cura completa da Resol acarreta alto módulo de elasticidade, alta reticulação, moderada temperatura de transição vítrea ( $\sim 150^\circ\text{C}$ ), exibindo excelente umidade e resistência ao calor (PAGLIOSA NETO, 2004).

### **3.3 Aplicações de tijolos de MgO-C**

Os tijolos de MgO-C são utilizados em fornos elétricos, convertedores LD e no refino secundário do aço. Nos fornos elétricos, eles são utilizados em pontos quentes, na soleira dos fornos e na linha de escória. Recentemente, começaram a ser usados também na soleira de plugs, na bucha do furo de corrida e na soleira de fornos elétricos.

Em convertedores LD, quase todo o revestimento é feito de tijolos de MgO-C. É esperado que ele continue a ser o tipo mais utilizado. No entanto, a melhoria das condições de operação e tecnologias de reparo têm aumentado a vida útil dos convertedores, o que pode gerar um decréscimo na quantidade necessária desses tijolos no futuro.

No refino secundário, o revestimento da linha de escória de painéis de aço é de MgO-C. Estão propensos a danos nas juntas e ao longo das fronteiras com outros tipos de tijolos e seu uso é recomendado em fornos que operam com pressões reduzidas (ANDOH, 1998).

## **4 METODOLOGIA**

A preparação e os ensaios dos materiais foram realizados em várias etapas, conforme a sequência do processo fabril. A metodologia para cada etapa será detalhada nos itens que seguem.

### **4.1 Confeção dos corpos de prova e tijolos**

#### ***4.1.1 Preparação das massas***

Foram produzidas 18 massas de, aproximadamente, 1200 kg, utilizando-se as matérias primas e a resina conforme formulação do produto e misturando-as conforme critério de fabricação da empresa em misturador de mós Richard, modelo RM-3000, durante 35 minutos. Em seguida, as massas foram descarregadas em caixas metálicas para descanso e retirada das amostras.

#### ***4.1.2 Descanso das massas***

As massas descansaram entre 1 e 12 horas ao ar antes da etapa de prensagem, conforme disponibilidade da prensa e demanda de produção da fábrica. O intervalo de descanso não foi objeto de controle neste estudo, para não impactar a produtividade da linha.

#### ***4.1.3 Amostragem das massas***

Foram retiradas 4 amostras de 450 g de cada uma das 18 massas. As amostras foram quarteadas conforme norma interna, adaptada da norma ISO 8656-1. A primeira amostra de cada massa foi destinada à análise granulométrica e as demais foram destinadas à confecção dos corpos de prova. Foi retirada, também, uma amostra de 20 kg de cada massa para confecção do tijolo.

#### **4.1.4 Prensagem das amostras**

Foram produzidos 54 corpos de prova por prensagem uniaxial em prensa hidráulica Amsler FM-2750 de capacidade 100T à pressão máxima média de  $19,0 \pm 0,4$  KN/cm<sup>2</sup>, com dimensões de 60 mm de diâmetro e altura de  $54,5 \pm 2,0$  mm. Devido às condições do equipamento, não foi registrada a velocidade de avanço do pistão. A pressão final máxima ideal para se atingir as propriedades finais desta formulação em prensa hidráulica é de 30 KN/cm<sup>2</sup>, porém, a prensa em questão não atinge este valor.

Foram produzidos 18 tijolos por prensagem uniaxial em prensa de fricção Gutmann, modelo PF 600/700, à pressão máxima média de  $14,1 \pm 0,2$  KN/cm<sup>2</sup>, conforme critério de fabricação da empresa e dimensões 533 X 152 X 76 mm, com tolerância de  $\pm 2$  mm por dimensão.

#### **4.1.5 Cura dos corpos de prova e tijolos**

Os 54 corpos de prova e 18 tijolos foram curados em estufa com patamar de 6 horas à temperatura de  $200 \pm 20^\circ\text{C}$ .

### **4.2 Técnicas de caracterização**

#### **4.2.1 Caracterização física da magnésia eletrofundida**

A caracterização física da magnésia eletrofundida foi realizada conforme norma NBR 8592. Os ensaios realizados foram de densidade mássica aparente (DMA) e porosidade aparente (PA). Foram analisados, durante 5 meses, 71 lotes desta matéria-prima.

#### **4.2.2 Análise granulométrica das massas**

As 18 amostras de 450 g foram submetidas a ensaios de granulometria conforme norma NBR 6946 e, em seguida, as curvas granulométricas obtidas foram comparadas à curva granulométrica especificada para o produto em questão.

#### **4.2.3 Medição do P/V cru dos corpos de prova e tijolos**

O P/V cru é um item de controle de processo intermediário e é realizado após a prensagem para medir a densidade obtida, uma vez que, ao final do processo, é desejada alta densidade para estes refratários.

Os 54 corpos de prova foram pesados em balança Metler Toledo, de capacidade 7 kg e erro de  $\pm 0,1$  g, e tiveram suas dimensões medidas com paquímetro digital Mitutoyo 300mm. O diâmetro foi medido nas duas extremidades do corpo de prova e foi feita média aritmética dos dois valores. A altura foi medida em 3 posições simétricas do corpo de prova e foi feita média aritmética dos três valores.

Os tijolos foram pesados em balança Alfa de capacidade 30 kg e erro de  $\pm 0,1$  kg e tiveram suas dimensões medidas com o mesmo paquímetro dos corpos de prova. A área é dada pelo molde e, portanto padronizadas (533 X 152 mm). A altura especificada é 76 mm. Foi medida nas duas extremidades e foi feita média aritmética dos dois valores, com tolerância de  $\pm 2,0$  mm para cada dimensão.

#### **4.2.4 Caracterização físico-mecânica dos corpos de prova e tijolos**

Os ensaios de liberação de produto final comumente utilizados são os de densidade mássica aparente (DMA), porosidade aparente (PA) e resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA). Os três medem propriedades finais desejadas para os refratários, que são a alta densidade, baixa porosidade e alta resistência mecânica.

Para os 54 corpos de prova e 18 tijolos foram realizados testes de DMA, PA e RCTA. Não foi realizada caracterização química das amostras, uma vez que o trabalho avaliou apenas propriedades físico-mecânicas.

Os 54 corpos de prova foram submetidos, inicialmente, ao teste de DMA e PA conforme adaptação da norma NBR 6220, diferenciando-se apenas na dimensão dos mesmos. Em seguida, foram secados em estufa Marconi por 12 horas à temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Por fim, foram submetidos ao teste de RCTA conforme adaptação da norma NBR 6224, diferenciando-se apenas na dimensão dos mesmos.

Dos 18 tijolos foram retirados 4 corpos de prova de cada, sendo 2 para DMA e PA e 2 para RCTA. Os ensaios de DMA e PA foram feitos conforme norma NBR 6220 e o RCTA foi realizado conforme norma NBR 6224.

### **4.3 Cálculo de mão-de-obra necessária à implantação do ensaio**

Inicialmente, foi retirado do sistema o histórico 2012 de produção média mensal da fábrica. Com esse dado e com base no número de dias trabalhados por mês, calculou-se a produção diária média. Baseando-se no peso médio de cada mistura, calculou-se o número médio de misturas produzidas diariamente, que seria também o número médio de ensaios a se fazer por dia.

Em seguida, foi realizada cronoanálise do ensaio, que englobou a retirada de 1 amostra da massa, sua colocação no molde, prensagem, pesagem do corpo de prova, medida do volume do corpo de prova e cálculo do P/V cru do corpo de prova.

Por fim, baseando-se no regime de trabalho vigente na fábrica, calculou-se o número de operadores necessários para realizar os ensaios diariamente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização física da magnésia eletrofundida

A Tabela 4 apresenta a média dos resultados obtidos para a DMA e PA dos lotes de magnésia eletrofundida utilizados para produção das massas. A especificação de DMA para essa matéria-prima é de  $\geq 3,30 \text{ g/cm}^3$  e o valor típico de PA é de 5,5%.

**Tabela 4 – Resultados de DMA e PA da magnésia eletrofundida**

Ensaio	Média dos resultados	Desvio padrão dos resultados	Variância dos resultados
DMA	3,31	0,01	0,00
PA	5,5	0,40	0,16

Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicam que a magnésia eletrofundida utilizada encontrava-se dentro do especificado, podendo haver variação de um lote para outro, mas não se tem a caracterização do lote específico utilizado em cada massa.

### 5.2 Análise granulométrica das massas

Todas as amostras analisadas estavam dentro da curva granulométrica projetada para essa formulação, porém, por segredo industrial, não puderam ser divulgadas neste trabalho.

### 5.3 P/V cru obtido para os corpos de prova e tijolos

A Tabela 5 apresenta o resultado médio de P/V cru obtido para as 18 massas, tanto para os tijolos quanto para os corpos de prova. A especificação de P/V cru para essa massa é de 3,05 a  $3,09 \text{ g/cm}^3$ , sendo  $3,07 \text{ g/cm}^3$  a média.

Tabela 5 – P/V cru obtido para cada massa

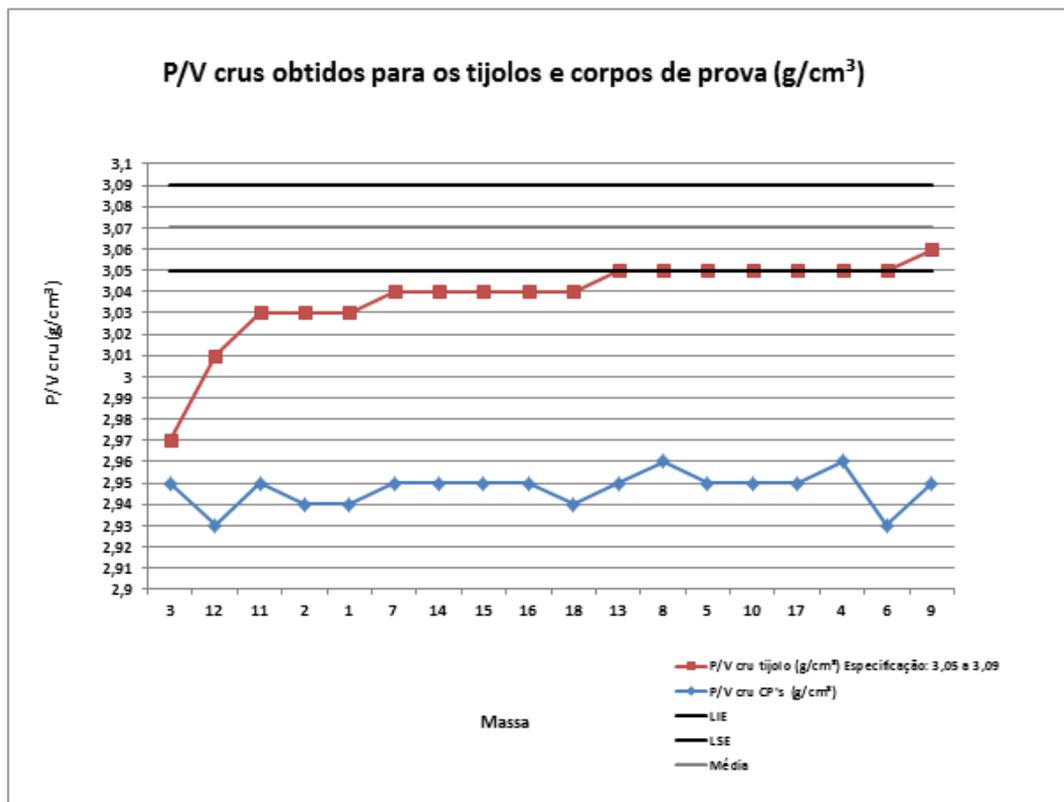
	P/V cru médio obtido	Desvio padrão dos resultados	Variância dos resultados
Tijolos	3,04	0,02	0,00
Corpos de prova	2,95	0,01	0,00

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova obtiveram uma média de P/V cru abaixo do P/V cru médio dos tijolos, conforme esperado, uma vez que o método de prensagem utilizado foi prensagem hidráulica, que promove menor compactação do que a prensagem de fricção utilizada para os tijolos e, além disso, a pressão final máxima aplicada aos corpos de prova foi inferior à necessária em prensa hidráulica para esta formulação.

A Figura 11 apresenta os resultados comparativos entre os P/V crus obtidos para cada tijolo e os P/V crus médios dos corpos de prova, para cada uma das 18 massas.

Figura 11 – P/V crus obtidos para os tijolos e corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar, na Figura 11, que 10 tijolos não obtiveram o P/V cru dentro do especificado pela fábrica (3,05 a 3,09 g/cm<sup>3</sup>) e os que obtiveram, foram entre a média (3,07 g/cm<sup>3</sup>) e o limite inferior especificado (3,05 g/cm<sup>3</sup>), apesar de os resultados obtidos para a DMA e PA dos aglomerados (magnésia eletrofundida) estarem dentro do especificado.

A variação no P/V cru do tijolo não necessariamente implicou na mesma variação de P/V cru do corpo de prova, sugerindo que o comportamento do corpo de prova não poderia ser utilizado para se prever o comportamento do tijolo. O tempo de descanso desigual para as massas somado à pressão aplicada nos corpos de prova variando desde 18,6 KN/cm<sup>2</sup> até 19,4 KN/cm<sup>2</sup> pode ter influenciado nesses resultados. Na prensagem dos tijolos, a pressão de prensagem foi a mesma para todas as massas.

#### 5.4 Tempo de descanso realizado

A Tabela 6 apresenta os tempos de descanso realizados para cada massa.

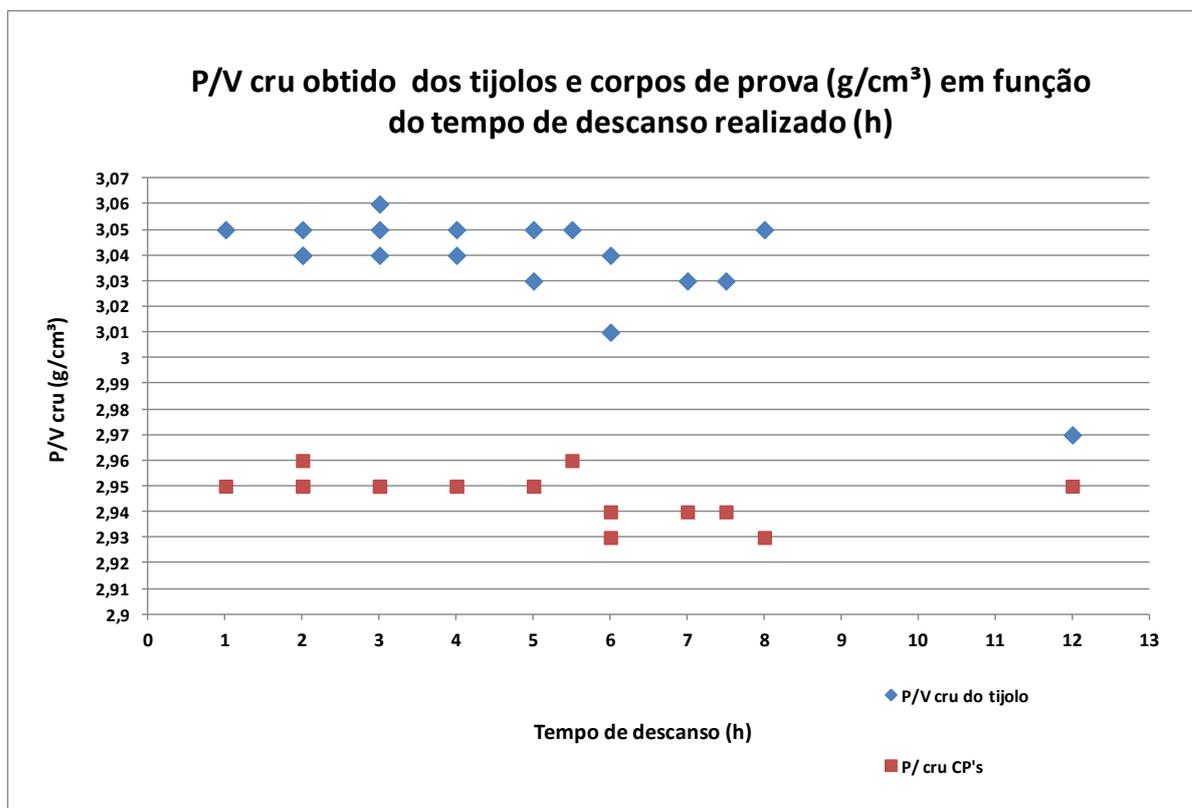
**Tabela 6 – Tempos de descanso realizados**

Massas	Tempo de descanso realizado (h)
1	07:30
2	07:00
3	12:00
4	05:30
5	03:00
6	08:00
7	02:00
8	02:00
9	03:00
10	04:00
11	05:00
12	06:00
13	01:00
14	02:00
15	03:00
16	04:00
17	05:00
18	06:00

Fonte: Autoria própria.

O tempo de descanso estabelecido no critério de fabricação é de 1 a 8 horas. A amostra 3 descansou propositalmente 12 horas, para representar um exemplo de produto que não foi feito conforme o critério de fabricação e verificar sua influência na compacidade da massa. Graças a isso, não apresentou a plasticidade ideal durante a prensagem, não sendo possível obter as dimensões desejadas para o tijolo. As demais massas tinham plasticidade suficiente para atingir as dimensões desejadas sem, no entanto, aumentar a pressão aplicada. Não houve defeitos em nenhum dos corpos de prova e tijolos. A Figura 12 apresenta o comportamento do P/V cru dos tijolos e corpos de prova em função do tempo de descanso realizado das massas.

**Figura 12 – P/V cru obtido dos tijolos e corpos de prova em função do tempo de descanso das massas.**

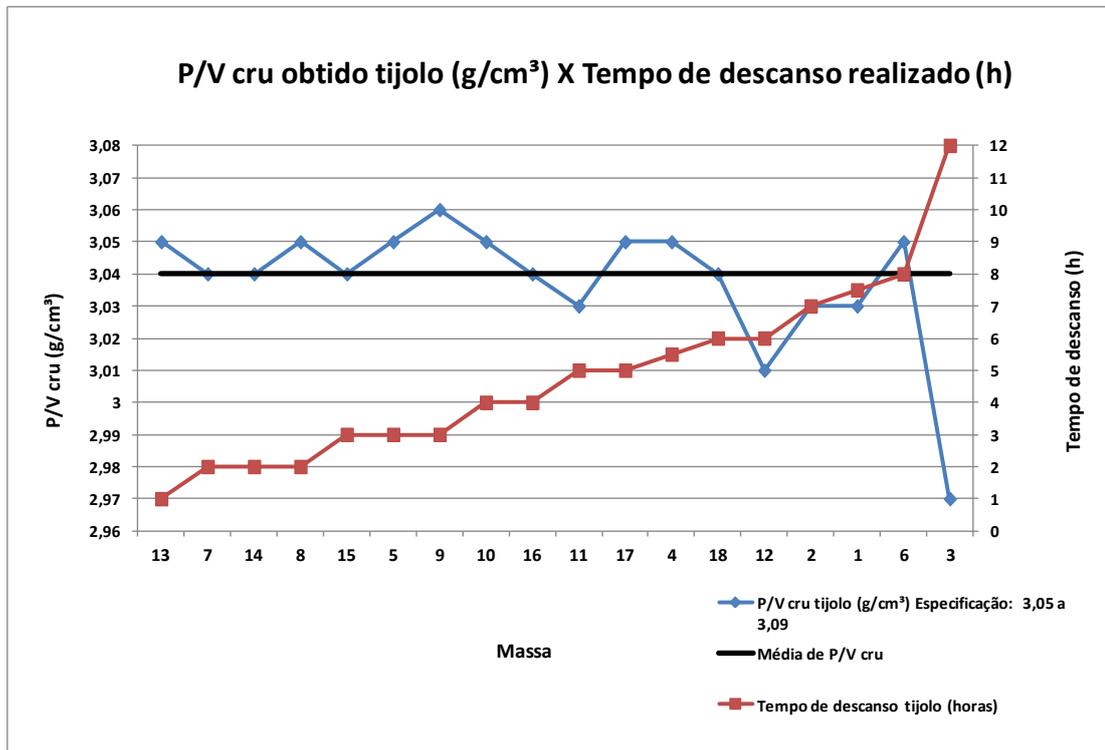


Fonte: Autoria própria.

Ao analisar a Figura 13, que apresenta os P/V crus obtidos para os tijolos em função do tempo de descanso realizado, pode-se observar que, a partir de 6 horas de descanso, há um decréscimo nos P/V crus atingidos, sugerindo perda de plasticidade da massa, com exceção da massa 6, que atingiu 3,05 g/cm<sup>3</sup>. Apesar de não divulgada neste trabalho devido ao segredo industrial, a curva granulométrica da massa 6 teve um percentual mais alto de aglomerados se comparada às demais (ainda dentro da especificação), o que justificaria seu P/V cru mais alto.

Além disso, comparando os resultados das massas 12 e 18, verifica-se que ambas descansaram 6 horas, porém, apresentaram P/V cru muito diferente. Nos corpos de prova dessas duas massas (Figura 13), o resultado foi próximo, o que sugere um possível erro na medição do P/V cru do tijolo para a amostra 12, que apresentou o resultado mais divergente em relação aos demais resultados.

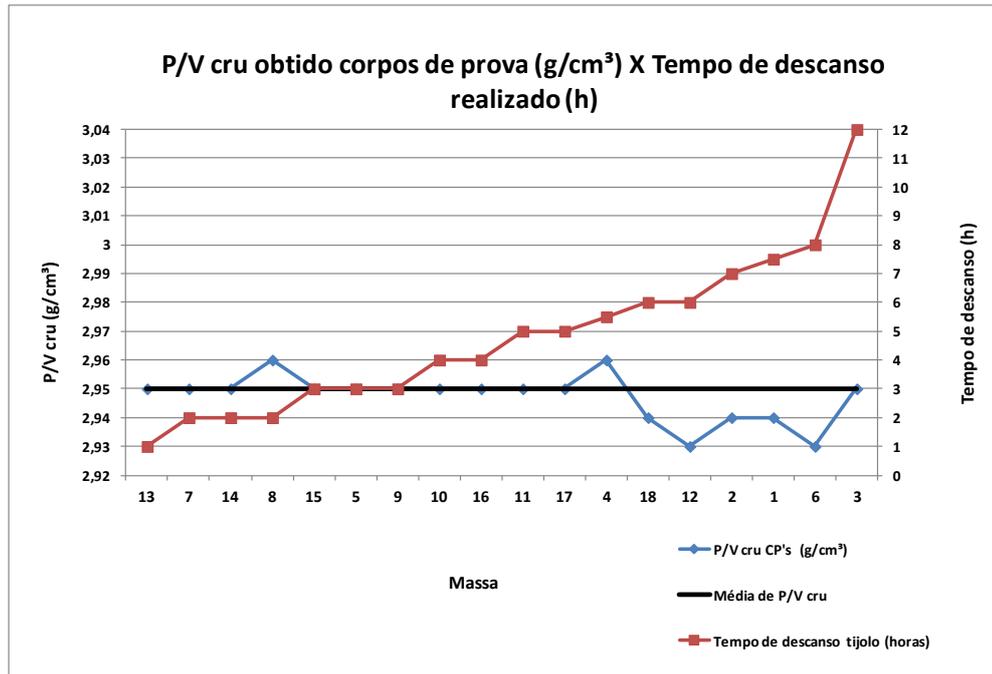
**Figura 13 – P/V cru obtido para os tijolos em função do tempo de descanso da massa**



Fonte: Autoria própria.

A Figura 14 apresenta os P/V crus médios obtidos para os corpos de prova em função do tempo de descanso realizado.

**Figura 14 – P/V cru obtido para os corpos de prova em função do tempo de descanso da massa**



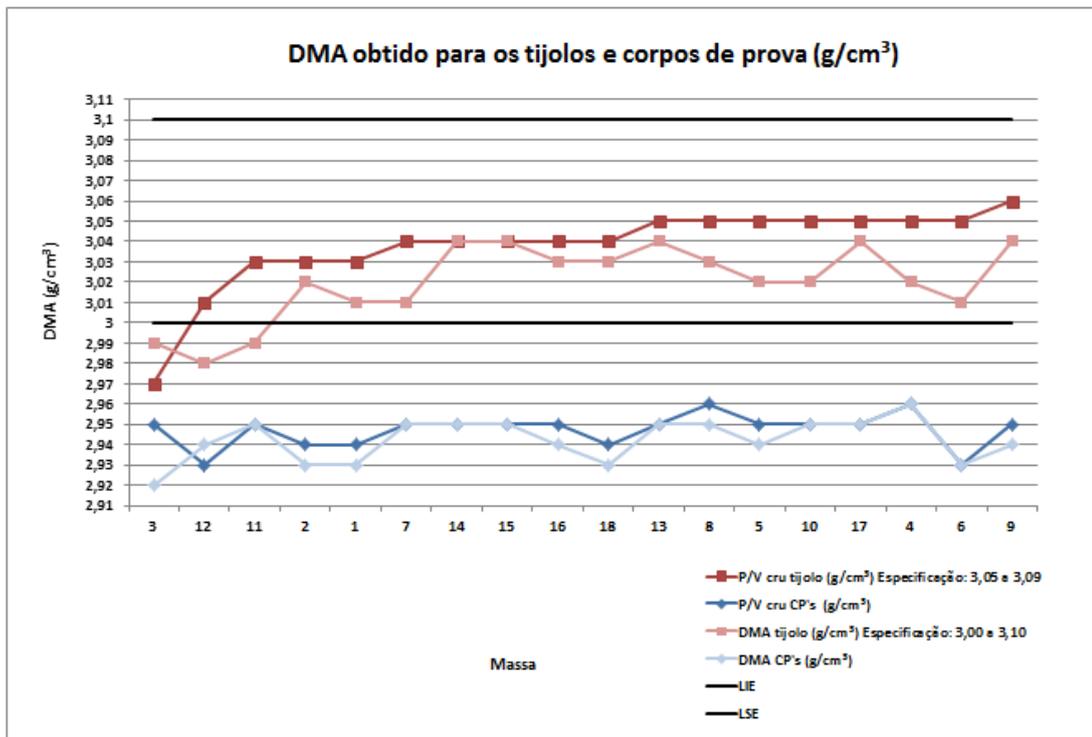
Fonte: Autoria própria.

Semelhantemente ao ocorrido com os tijolos, a partir de 6 horas de descanso, houve um decréscimo no P/V cru obtido para os corpos de prova, sugerindo perda de plasticidade da massa.

## 5.5 Densidade mássica aparente (DMA)

A Figura 15 apresenta os resultados comparativos entre P/V cru e DMA obtidos para cada tijolo e a média para os corpos de prova, para cada uma das 18 massas.

Figura 15 – P/V cru X DMA obtidos para os tijolos e corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

A maioria dos resultados de DMA obtidos para os tijolos está dentro da especificação ( $3,00$  a  $3,10 \text{ g}/\text{cm}^3$ ), mesmo que, em alguns casos, o P/V cru estivesse abaixo do especificado.

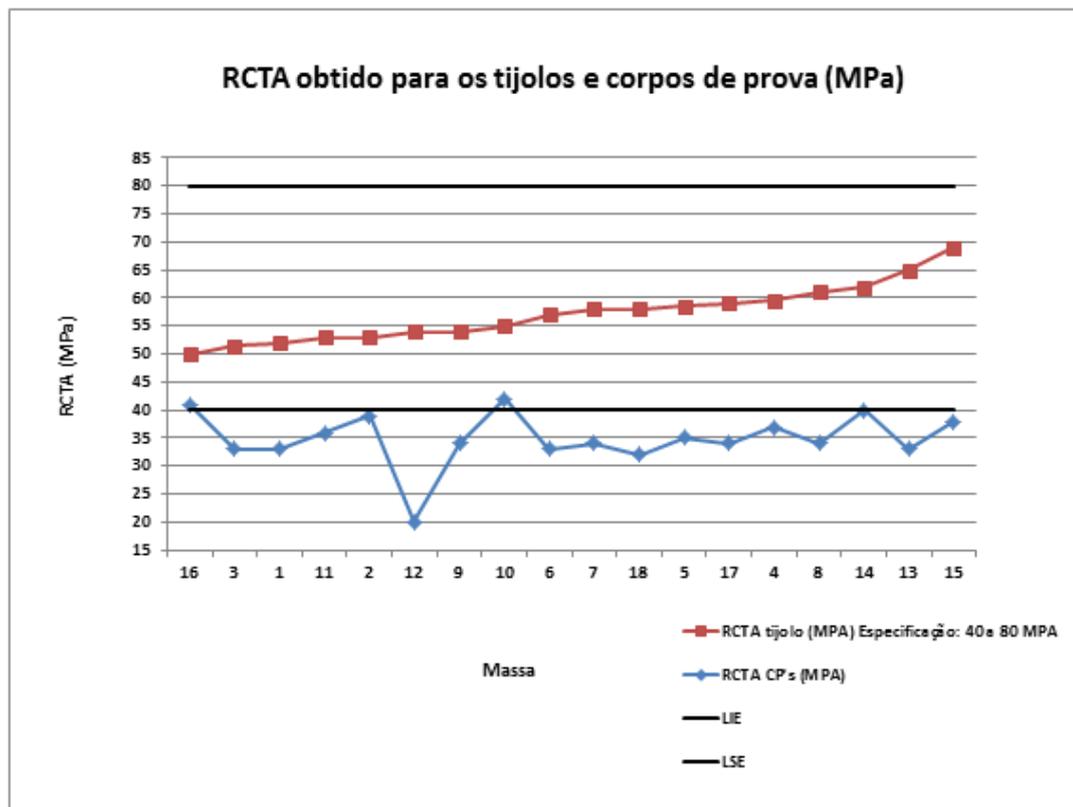
Pode-se observar também, pela Figura 15, que a maioria dos resultados de DMA foi menor ou igual aos valores de P/V cru, tanto para os tijolos quanto para os corpos de prova. Isso era esperado, uma vez que o tratamento térmico promove volatilização da água presente na resina e alguns voláteis, reduzindo ligeiramente a massa e não promove sinterização, mantendo o volume inicial das peças. Para os que aumentaram, pode ter havido diferença nas medições, uma vez que pessoas diferentes realizaram os ensaios de P/V cru e DMA.

A variação no DMA do tijolo não necessariamente implicou na mesma variação no DMA do corpo de prova, o que já era esperado, devido às variações divergentes nos resultados de P/V cru.

## 5.6 Resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA)

A Figura 16 apresenta os resultados comparativos entre o RCTA obtido para cada tijolo e o RCTA médio obtido para os corpos de prova, para cada uma das 18 massas.

Figura 16 – RCTA obtido para os tijolos e corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

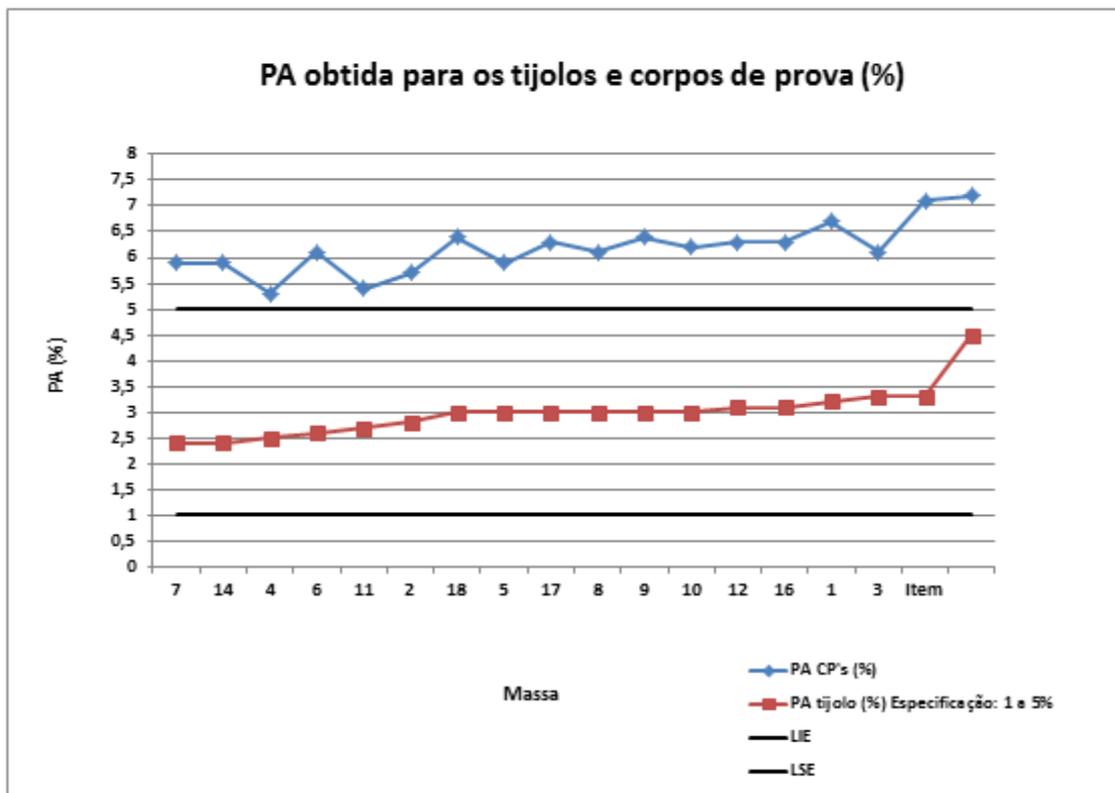
Pode-se observar, pelo gráfico, que todos os tijolos obtiveram o RCTA dentro da especificação (40 a 80 MPa), mesmo os que estavam fora da especificação no item de controle de processo P/V cru. Os corpos de prova apresentaram RCTA abaixo do especificado, como era esperado, uma vez que a pressão máxima final aplicada foi inferior ao valor especificado para prensagem hidráulica, com exceção das amostras 10 e 16.

A variação no RCTA do tijolo não necessariamente implicou na mesma variação de RCTA dos corpos de prova.

## 5.7 Porosidade aparente (PA)

A Figura 17 apresenta os resultados comparativos entre a PA obtida para cada tijolo e a PA média obtida para os corpos de prova, para cada uma das 18 massas.

Figura 17 – PA obtida para os tijolos e corpos de prova



Fonte: Autoria própria.

Todos resultados de PA obtidos para os tijolos estão dentro da especificação (1 a 5%). Os corpos de prova obtiveram PA fora da especificação, conforme era esperado, uma vez que a pressão máxima final aplicada foi inferior ao valor especificado para prensagem hidráulica, logo houve menor compactação e menor empacotamento, acarretando maior porosidade. Diferentemente dos outros ensaios, a variação na PA dos corpos de prova acompanhou mais a variação na PA dos tijolos, sugerindo que essa seria a característica ideal para liberação final na etapa de Controle de Qualidade de tijolos a partir de corpos de prova.

## 5.8 Mão-de-obra necessária à implantação do ensaio

A Tabela 7 apresenta os dados utilizados para cálculo de mão de obra necessária à implantação do ensaio.

**Tabela 7 – Cálculo de mão-de-obra necessária**

Cálculos		
Produção média mensal	3.413,7	ton
Dias trabalhados/mês	22,0	dias
Produção média/dia	155,2	ton/dia
Produção média/turno	51,7	ton/turno
Peso médio mistura	1,2	ton
Nº misturas/turno	43,1	misturas/turno
Tempo médio do ensaio	12,0	minutos
Tempo de trabalho/turno	8,6	horas/turno
<b>Operadores necessários</b>	<b>1,1</b>	<b>operadores/turno</b>

Fonte: Autoria própria.

O valor obtido de 1,1 operadores por turno foi considerando que os operadores trabalhariam ininterruptamente, ensaio após ensaio, com 1 hora de almoço apenas, desconsiderando-se pausas para descanso, idas ao banheiro e para beber água, fadiga do operador, dentre outros. Sendo assim, para a implantação do ensaio na fábrica seria necessário um aumento no quadro de pessoal conforme a Tabela 8. O regime ininterrupto prevê a formação de uma quarta turma, uma vez que sempre há uma de folga.

**Tabela 8 – Aumento do quadro de pessoal necessário**

REGIME	Nº DE TURMAS NECESSÁRIAS	TOTAL DE PESSOAS
3 turnos (folga no fim de semana)	3	6
Ininterrupto	4	8

Fonte: Autoria própria.

## 6 CONCLUSÃO

Foi observado que, a partir de 6 horas de descanso da massa, tanto os tijolos quanto os corpos de prova apresentaram P/V crus abaixo da média geral, evidenciando redução em sua plasticidade. Isso sugere a necessidade de revisão da especificação de tempo de descanso máximo para este produto.

Foi observado também que, apesar de a maioria dos tijolos apresentarem P/V cru abaixo da especificação, as características dos aglomerados (magnésia eletrofundida) estavam adequadas e as propriedades finais de DMA, RCTA e PA também, sugerindo que a faixa de especificação de P/V cru deve ser revisada.

Não foi possível concluir se a massa poderia ser liberada a partir do P/V cru do corpo de prova, uma vez que seus resultados não tiveram variações semelhantes à dos tijolos, que era o desejável para, a partir do P/V cru dos corpos de prova, se prever o comportamento dos tijolos. A pequena variação na pressão aplicada somada à variação no descanso das massas podem ter afetado nestes resultados. Para se confirmar isso, mais estudos seriam necessários fixando uma das duas variáveis. A variação no tempo de descanso é uma condição normal da fábrica, portanto o ideal seria adequar a prensa Amsler para garantir a pressão constante ou adquirir uma prensa mais moderna.

Dentre as propriedades finais avaliadas comparativamente para os tijolos e corpos de prova, a única que apresentou variação no tijolo semelhante à variação no corpo de prova foi a PA, sugerindo que ela seria a única propriedade final que permitiria a liberação dos tijolos a partir dos corpos de prova. No entanto, é importante avaliar-se as propriedades finais de DMA e RCTA, ou seja, continuaria sendo necessário retirar amostras de tijolos para estes dois ensaios.

Diante destes resultados, a equipe de fábrica concluiu que seriam necessários investimentos e mais estudos para a implantação deste ensaio, bem como um aumento considerável no quadro de pessoal. Sendo assim, ficou definido que deveria ser realizada uma revisão nas especificações do produto e seria estabelecido um controle mais rígido e padronizado nas etapas anteriores, pois isso garantiria a qualidade da massa durante a prensagem e, por conseguinte, o atingimento das propriedades finais. Para a etapa final de controle de qualidade, foi definido que dever-se-ia buscar outras estratégias de redução de custos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e a sua aplicação industrial. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, set/out 2000. v. 5.
- ANDOH, Takeshi et al. **Refractories handbook**. Japão: The Technical Association of Refractories, 1998.
- BAG, Mousom. **Development of environment friendly new generation MgO-C brick using nano carbon**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Ceramic Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2011.
- BONADIA NETO, Paschoal. **Relatório de matérias-primas refratárias**. Contagem: Magnesita Refratários S.A., 2009.
- BUSTAMANTE, G. M; BRESSIANI, J. C. A indústria cerâmica brasileira. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, mai/jun 2000. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n03/v5n3\\_5.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v05n03/v5n3_5.pdf)>. Acesso em: 23 mar. 2013.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CAMPOS, Karina Silva. **Síntese e caracterização de materiais antioxidantes à base de boro via processo sol-gel e redução metalotérmica para a prevenção da oxidação de materiais refratários contendo carbono**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- MATOS JUNIOR, José V. **Cominuição - britagem e moagem**. Contagem: Magnesita Refratários S.A., 2006. (Módulo V) a
- MATOS JUNIOR, José V. **Tecnologia de mistura**. Contagem: Magnesita Refratários S.A., 2006. (Módulo VIII) b
- MATOS JUNIOR, José V. **Tecnologia de prensagem**. Contagem: Magnesita Refratários S.A., 2006. (Módulo IX) c
- MATOS JUNIOR, José V. **Tecnologia de refratários básicos**. Contagem: Magnesita Refratários S.A., 2006. (Relatório) d
- PAGLIOSA NETO, Carlos. **Rheological investigations of phenolic resin interactions with refractory raw materials**. 2004. Pós doutorado - Swiss Federal Institute of Technology - ETH, Zurich, 2004.
- PANDOLFELLI, V. C., LUZ, A. P. **Atuação dos antioxidantes em refratários contendo carbono**. São Carlos: UFSCar, 2007. Artigo - Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais (GEMM), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

REED, James S. **Introduction to the principles of ceramic processing**. EUA: Wiley-Interscience, 1988.