

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

ELISA MONTEIRO DO AMARAL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DISPERSÃO DAS  
PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS**

**BELO HORIZONTE**

**2016**

ELISA MONTEIRO DO AMARAL

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DISPERSÃO DAS  
PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
no curso de 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: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2016

ELISA MONTEIRO DO AMARAL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DISPERSÃO DAS  
PARTÍCULAS NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
no curso de 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: 30/06/2016

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva – Orientador

---

Prof. Dr. Joel Lima

---

Prof. Msc. Luciana Boaventura Palhares

## RESUMO

Os concretos refratários são utilizados em revestimentos internos de equipamento industriais e submetidos a ambientes severos e condições extremas. Para melhorar a durabilidade nessas condições de uso, o desempenho e as propriedades dos concretos devem ser otimizadas. O processamento dos concretos, influenciados por sua reologia, é dependente da distribuição granulométrica e do estado de dispersão das partículas. Esses parâmetros vão definir o nível de fluidez da mistura, a qual determina as técnicas utilizadas para aplicação. Nesse contexto, esse estudo buscou avaliar o impacto da distribuição granulométrica e estado de dispersão da mistura nas propriedades dos concretos, de modo a se prever qualitativamente a fluidez, densidade, porosidade e resistência mecânica dos concretos para avaliar a compatibilidade das propriedades com o processo. Foram formuladas duas composições contendo diferentes percentuais de matriz (G1 com 40% e G2 com 60%). Para cada uma delas, adicionou-se três quantidades de dispersantes (0,025%, 0,050% e 0,075%). Os resultados mostraram-se coerentes com a teoria abordada, confirmando que a maior presença de matriz demandou maior teor de água; que, por sua vez, aumentou a fluidez e facilitou o processo de moldagem. No entanto, resultou no aumento da porosidade e reduziu a resistência à compressão, prejudicando o comportamento mecânico do concreto. Já o acréscimo de dispersantes, em todas as proporções, melhorou as propriedades de processamento (fluidez e trabalhabilidade) e otimizou o adensamento do material, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas devido à redução da porosidade.

**Palavras-chave:** granulometria, dispersão, concretos refratários, fluidez, trabalhabilidade, propriedades termomecânicas.

## ABSTRACT

Refractory castables are used to lining industrial equipment and subjected to harsh environments and extreme conditions. Performance and property of refractory should be optimized to enhance durability in these conditions. The castables processing is influenced by its rheology and dependent on particle size distribution and particle dispersion. These parameters will define the level of flowability in mixture, which determines techniques used for application. In this context, this study aimed to evaluate the impact of particle size distribution and state of dispersion of mixture in castables properties, in order to predict the flowability, density, porosity and mechanical strength, for assessing the compatibility of properties with the process. Two compositions were made containing different matrix percentages (G1 with 40% and G2 with 60%). Three amount of dispersant (0.025%, 0.050% and 0.075%) were added to each mixture. The results were consistent with theory discussed, confirming that increasing presence of matrix require higher water content, which increased the flow (on average 35%) and simplified molding process. However, it resulted in an increase of porosity, and reduction of resistance, impairing mechanical behavior of material. Addition of dispersants in all ratios improved processing properties (flowability and workability) and optimized densification of the material, resulting in improvement in mechanical property due to reduction in porosity.

**Keywords:** particle size, dispersion, refractory concrete, flowability, workability, thermomechanical properties.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais Refratários</b>	<b>10</b>
<b>3.2</b>	<b>Concretos Refratários</b>	<b>12</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Aplicação dos concretos refratários</i>	<b>13</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Secagem e sinterização</i>	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Características e Propriedades de Materiais Refratários</b>	<b>15</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Densidade/Porosidade</i>	<b>15</b>
<b>3.3.2</b>	<i>Resistência à compressão</i>	<b>16</b>
<b>3.3.3</b>	<i>Trabalhabilidade do concreto</i>	<b>17</b>
<b>3.3.3.1</b>	<i>Fatores que influenciam a trabalhabilidade</i>	<b>17</b>
<b>3.3.4</b>	<i>Permeabilidade</i>	<b>18</b>
<b>3.3.5</b>	<i>Expansão térmica</i>	<b>19</b>
<b>3.3.6</b>	<i>Condutividade térmica</i>	<b>19</b>
<b>3.3.7</b>	<i>Refratariedade</i>	<b>19</b>
<b>3.3.8</b>	<i>Resistência ao choque térmico</i>	<b>20</b>
<b>3.3.9</b>	<i>Resistência à corrosão</i>	<b>20</b>
<b>3.3.10</b>	<i>Resistência à abrasão e erosão</i>	<b>21</b>
<b>3.3.11</b>	<i>Tempo de pega</i>	<b>21</b>
<b>3.3.12</b>	<i>Coesão</i>	<b>22</b>
<b>3.3.13</b>	<i>Segregação</i>	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Distribuição Granulométrica</b>	<b>22</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Fatores que influenciam o empacotamento de partículas</i>	<b>23</b>
<b>3.4.2</b>	<i>Efeito da distribuição granulométrica sobre as propriedades reológicas de concretos refratários</i>	<b>25</b>
<b>3.5</b>	<b>Dispersões em concretos refratários</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>29</b>

<b>4.2</b>	<b>Formulações</b>	<b>30</b>
<b>4.2.1</b>	<i>Análise Granulométrica</i>	<b>31</b>
<b>4.2.2</b>	<i>Análise Química</i>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>Processamento do Concreto</b>	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>Fluidez da Mistura</b>	<b>33</b>
<b>4.5</b>	<b>Confecção de Corpos de Prova</b>	<b>34</b>
<b>4.5</b>	<b>Densidade Aparente (DMA) e Porosidade Aparente (PA)</b>	<b>35</b>
<b>4.6</b>	<b>Resistência à Compressão à Temperatura Ambiente (RCTA)</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Granulometria</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise Química</b>	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Processamento do Concreto</b>	<b>37</b>
<b>5.4</b>	<b>Fluidez e trabalhabilidade</b>	<b>38</b>
<b>5.5</b>	<b>Densidade Aparente (DMA), Porosidade Aparente (PA) e Resistência à Compressão (RCTA)</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Materiais refratários são utilizados em revestimentos de equipamentos industriais cujo ambiente de operação inclui condições extremas em altas temperaturas, severas solicitações termomecânicas e constantes ataques químicos (SAKO, 2014). Para que o revestimento refratário resista a esses fatores destrutivos quando em uso, deve-se conhecer as propriedades específicas de modo a otimizar a vida útil do revestimento, a fim de demandar menor manutenção do equipamento e possibilitar reduções de custos operacionais e de paradas da produção para recuperação (RAAD, 2008).

Destacam-se, dentre as propriedades dos refratários, a porosidade e resistência mecânica à compressão, sendo que uma relaciona-se diretamente com a outra. A porosidade, quando aberta, aumenta a probabilidade de ataque químico no material pela maior interação com os fluidos agressivos. A porosidade é reflexo, dentre outros fatores, do processo de fabricação do refratário. Os vazios presentes na estrutura reduzem os valores de resistência mecânica, considerando que as fraturas iniciam-se, preferencialmente, em falhas estruturais superficiais. (COTTA, 2014).

Dentre os tipos de materiais refratários, os concretos refratários são vastamente utilizados por combinarem facilidade e flexibilidade de instalação, menor tempo e custo produção, e ainda apresentarem desempenho similar aos refratários previamente sinterizados (RAMAL Jr *et al*, 2002). Os concretos são uma associação de agregados (partículas > 100 µm) e matriz (partículas finas, aditivos, ligantes). Na matriz, há o predomínio de forças de superfície, enquanto que nos agregados, de forças mássicas. Portanto, nos concretos há ambos os domínios de força, cujas propriedades são resultado das interações dos agregados imersos na matriz. Os concretos são aplicados no estado fluido, após serem misturados com água. (PILEGGI, 2002).

As partículas finas do concreto tendem a aglomerar-se espontaneamente devido às forças de atração de Van der Waals. Os aglomerados formados aprisionam em seu interior boa parte da água presente, de modo a prejudicar a fluidificação da mistura e o processo de aplicação. Para inibir a floculação das partículas, adiciona-se dispersantes à sua composição. Geralmente, as partículas podem ser dispersas por meio de estabilização elétrica, estérica ou eletroestérica. Dessa forma, visa-se produzir concretos que apresentem facilidade de manuseio e melhor adensamento. Com os dispersantes, a água já não é mais aprisionada no interior das partículas

(que não se aglomeram) e maior será a sua contribuição para o fluxo de movimentação da mistura (fluidez) (CHABAS, 2013).

Além da dispersão das partículas, o comportamento reológico da mistura vai estar relacionado com a granulometria do concreto. A granulometria consiste na distribuição de diferentes dimensões de partículas presentes na mistura. Um bom arranjo granulométrico baseia-se em uma compactação com menor índice de vazios, o que resulta na melhoria das propriedades físicas. Isto pode ser alcançado à medida que as partículas menores preenchem os interstícios entre as partículas maiores e assim por diante (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

Diante dessas afirmações, a relevância do trabalho consiste em analisar a granulometria e o estado de dispersão das partículas, uma vez que podem influenciar nas propriedades dos concretos refratários. Além disso, este estudo busca aumentar o desempenho desses concretos ao combinar melhoria no processamento (melhorando a fluidez e trabalhabilidade), comportamento mecânico e durabilidade (resistência, densidade e porosidade).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar a relação entre distribuição granulométrica e percentual de dispersante nas propriedades de concretos refratários.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Relacionar a variação na granulometria (relação matriz e agregados) de concretos refratários à base de alumina com o teor necessário de água para a mistura;
- b) Relacionar a adição de dispersante na fluidez e trabalhabilidade dos concretos;
- c) Relacionar a variação de granulometria e dispersão com a densidade, porosidade e resistência à compressão após os processos de secagem e queima (sinterização).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Materiais Refratários

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM), materiais refratários são materiais cerâmicos cuja principal característica é a resistência a temperaturas elevadas sem se decomporem ou entrarem em fusão, além de serem capazes de permanecer não-reativos em ambientes severos. Também são resistentes à corrosão e erosão por metais líquidos, escórias e gases quentes. Devido a essas propriedades, são essenciais para a proteção em revestimentos internos de equipamentos industriais que operam em temperaturas superiores a 1200 °C, como fornos, panelas e chaminés de indústrias siderúrgicas, de fundição, de cimento e vidro. (SAKO, 2014).

As especificações técnicas e a vida útil dos refratários dependem das condições de uso, da posição do equipamento a serem aplicados, da interação entre matérias-primas e escória, de choques mecânicos e térmicos da operação. Por serem submetidos a condições extremas, os materiais refratários são trocados frequentemente (COTTA, 2014).

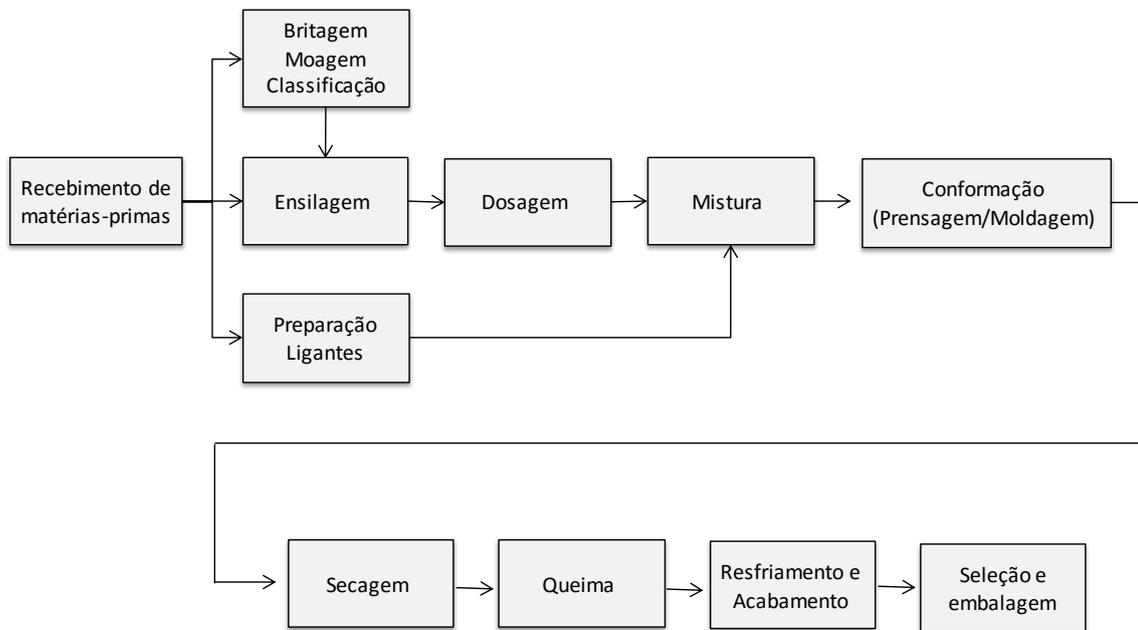
As principais matérias-primas dos refratários, que possuem ponto de fusão acima de 1800 °C, são: magnesita, dolomita e alumina. Também podem ser utilizadas em sua fabricação, mas em menor proporção, grafita, cromita, zircônia, dentre outros (RAAD, 2008).

Os materiais refratários podem ser categorizados de duas formas. A primeira é de acordo com sua classificação física: podem ser moldados (tijolos e peças especiais) ou monolíticos (concretos, argamassas, massas de projeção, massas de injeção, massas de socar, etc). E a segunda classificação é de acordo com sua composição química: podem ser ácidos (sílica, alumina), básicos (MgO, CaO, cromita) ou neutros (carbeto de silício, zircônia) (NAKAGAWA, 1998).

A fabricação de um material refratário (figuras 1 e 2) inicia-se no beneficiamento das matérias-primas, por meio de britagem, moagem e classificação. Após esta etapa, as matérias-primas podem ficar estocadas, para então serem pesadas, dosadas e misturadas nas proporções específicas de cada produto. Para os refratários monolíticos, após a mistura, são embalados para

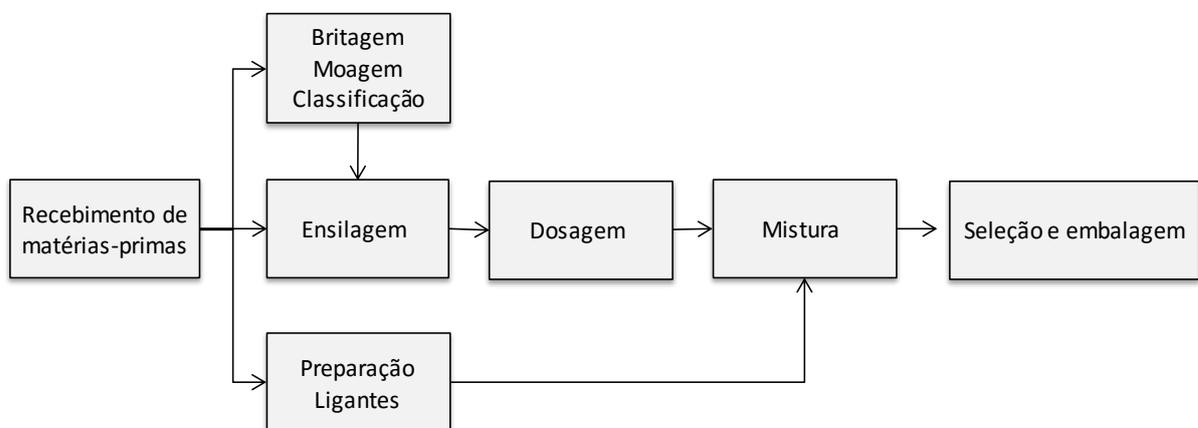
serem comercializados. Já os refratários moldados, passam ainda pelas etapas de conformação (prensagem ou moldagem), secagem, sinterização (queima) e embalagem (COTTA, 2014).

**Figura 1 – Fluxograma de fabricação de um material refratário moldado.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Figura 2 – Fluxograma de um material refratário monolítico (não moldado).**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.2 Concretos Refratários

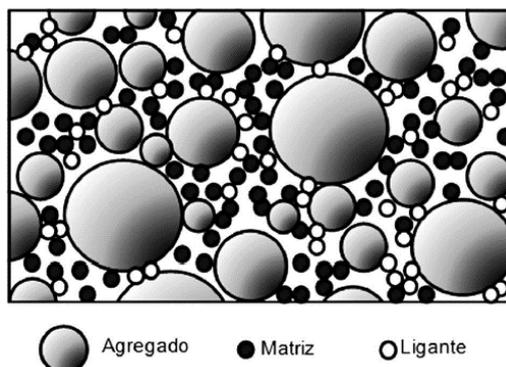
Os materiais refratários monolíticos são uma mistura de agregados secos cujo processo de fabricação é o mesmo dos refratários moldados, entretanto não passam pelos processos de prensa e queima. Justamente por isso, são materiais com custo relativamente menor quando comparados com os refratários moldados. São utilizados na manutenção e reparação de tijolos refratários já instalados nos equipamentos que sofreram maior desgaste. Exemplos de monolíticos são: argamassas, massas de socar, concretos, massas plásticas, etc. São amplamente empregados na indústria siderúrgica devido à facilidade e flexibilidade de instalação (RAAD, 2008).

Além do custo envolvido, os refratários monolíticos possuem as seguintes vantagens em relação aos conformados, segundo RAAD (2008):

- Redução do tempo de produção e aplicação;
- Possibilidade de utilização de processos automatizados;
- Execução de reparos com o equipamento ainda aquecido;
- Inexistência de juntas, que são consideradas como pontos de desgaste na estrutura, preservando, assim, o equipamento;
- Flexibilidade de formatos.

Dentre os produtos monolíticos refratários, os *concretos* são os mais empregados. Estes podem ser classificados como uma suspensão aquosa com alto teor de sólidos, composta pelos agregados e pela matriz, esquematizado na figura 3 (AMARAL, 2009).

**Figura 3 – Esquemática da composição de um material refratário.**



Fonte: SAKO, 2014.

Os *agregados* são as partículas maiores do que 100 µm e nelas tem-se domínio dos fenômenos de massa. Estão presentes em grandes quantidades e representam a maior parte do volume total. São materiais que dão enchimento ao concreto e geralmente inertes. Para concretos refratários, pode-se citar como os mais utilizados: chamote (argila calcinada), aluminas, magnésia, espinélio, escórias de alto forno e agregados reciclados (tijolos refratários britados). Os agregados influenciam nos concretos conforme suas características, tais como: dimensão, granulometria, textura superficial, tipo de formato, porosidade, resistência e presença de impurezas (RAAD, 2008).

A *matriz* é composta por partículas finas, agentes ligantes, aditivos químicos e água; na qual tem-se domínio dos fenômenos de superfície. Tem como objetivo preencher os espaços vazios entre os agregados de modo a otimizar o empacotamento do material e aumentar a densidade. A matriz é a responsável pela fluidez do concreto em estado fresco e é considerada como uma parte crítica em relação às reações químicas que ocorrem no concreto (AMARAL, 2009).

O *agente ligante* tem como objetivo proporcionar a coesão da mistura, e resistência mecânica a verde. O aglomerante mais utilizado para aplicações industriais é o cimento de aluminato de cálcio (CAC), que confere aos concretos alta resistência mecânica e a agentes agressivos quando em uso (SANTOS, 2008).

Os *aditivos* são acrescentados à mistura a fim de otimizar o desempenho dos concretos, de modo a influenciar as características de processamento, como o estado de dispersão das partículas, homogeneidade, plasticidade, propriedades reológicas, comportamento de pega e consumo de água (SANTOS, 2008).

### ***3.2.1 Aplicação de concretos refratários***

A aplicação dos concretos refratários inicia-se pela mistura do pó seco, proporcionando homogeneização e quebra dos aglomerados. Em seguida, adiciona-se água e o concreto passa do estado particulado para o estado fluido; essa transição é definida como "virada do concreto". Após a adição de água, o misturador homogeneiza e estabiliza seu estado de dispersão. Por fim, ocorre a etapa de aplicação do concreto (PILEGGI, 2000).

A aplicação é feita no estado viscoso, portanto, o estudo do comportamento reológico do material, observado de acordo com a sua fluidez, define o modo de moldagem. Dependendo do teor de água utilizado e da composição do concreto, a moldagem pode ser feita por fluência-livre (preenchimento dos moldes pela ação do próprio peso), vibração de alta ou baixa frequência, vertimento, socagem, bombeamento ou projeção (RAMAL Jr, 2002).

### ***3.2.2 Secagem e Sinterização***

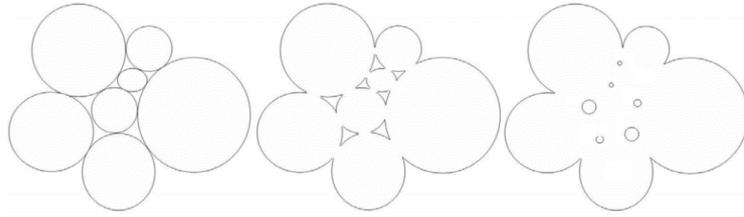
O processo de secagem dos concretos é umas das etapas de processamento mais importantes, que tem como objetivo retirar a água indesejada do material. Primeiramente, ocorre o aquecimento inicial até 100 °C causando a evaporação da água livre. Depois, com o aumento da temperatura, sucede-se a ebulição da água livre e formação de vapor. Por último, verifica-se decomposição da água combinada na forma de hidretos (SANTOS, 2008).

Em secagens cuja geração de vapor d'água no interior do material é maior que a liberação para a superfície, a tensão no interior dos poros pode causar fissuras ou até mesmo explosão. A otimização desse processamento é influência da melhoria da permeabilidade do material (corpo permeável previne acúmulo de vapores em sua estrutura) e de processos lentos de secagem (INNOCENTINI, 2001).

Depois da etapa de secagem, os concretos são sinterizados. Nesse processo, ocorre a ceramização do material, com substituição das ligações hidráulicas por ligações cerâmicas. O objetivo da sinterização é a densificação do material provocada pela coalescência entre as partículas por meio do transporte de matéria em escala atômica (difusão) e pelo aumento do tamanho de grão. Normalmente, a sinterização ocorre em temperaturas na ordem de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão do material (SOUZA, 2011).

A força motriz para a sinterização é a redução da energia superficial. Partículas menores possuem maior energia superficial e maior reatividade, e por isso sinterizam mais rapidamente. O resultado desse processamento é o aumento da densidade, redução do volume de poros, alteração da geometria dos poros e aumento da resistência mecânica (figura 4) (SILVA, 1998).

**Figura 4 – Esquematização do processo de redução de poros na sinterização.**



Fonte: FUCHS, 2008.

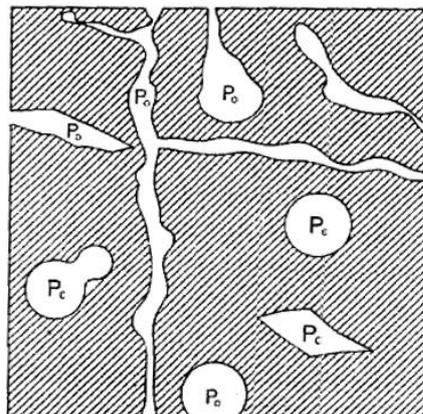
### 3.3 Características e Propriedades dos Concretos Refratários

Os concretos refratários são aplicados no revestimentos de equipamentos e, de acordo com as solicitações termomecânicas do local de instalação e as condições de uso, é imprescindível conhecer as propriedades específicas para se produzir refratários que resistam aos fatores destrutivos aos quais serão expostos. Suas propriedades são relacionadas às características químicas e mineralógicas de suas matérias-primas, bem como as tecnologias envolvidas em sua fabricação; distinguindo, assim, os diversos tipos de materiais refratários (RAAD, 2008).

#### 3.3.1 Densidade / porosidade

Os refratários possuem uma complexa estrutura que consiste em uma parte sólida composta por uma ou mais fases, e uma parte porosa, contendo espaços vazios. Os poros podem ser do tipo aberto, quando têm conexão com a superfície, ou do tipo fechado, quando estão isolados no interior do material. Também podem ser ou não comunicantes, conforme ilustrado na figura 5 (NAKAWAGA, 1998).

**Figura 5 – Esquematização de poros fechados ( $P_c$ ) e poros abertos ( $P_o$ ).**



Fonte: NAKAWAGA, 1998.

A porosidade é uma característica de extrema importância na análise de um refratário, pois influencia diretamente em suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas, a citar resistência e condutividade. Os poros abertos também afetam o modo de reação do material com gases e líquidos a altas temperaturas; sendo que o aumento da porosidade aumenta a probabilidade de ataque químico no material. Portanto, a porosidade é usada como parâmetro de controle de qualidade no processo de fabricação (COTTA, 2014).

A porosidade, por sua vez, é influenciada pelo processo de fabricação. O volume de vazios antes da queima representa 50%. Durante a queima, com a sinterização do pó compactado, a porosidade diminui e a densidade aparente aumenta. Isso significa dizer que o grau de sinterização influencia na densidade do refratário (NAKAGAWA, 1998).

A densidade, de modo geral, é a razão de massa e volume. O tipo de densidade analisada em refratários é a densidade de massa aparente (DMA), nas quais as amostras são compostas por poros, trincas, defeitos cristalinos, etc.

### ***3.3.2 Resistência à compressão***

Em geral, os materiais cerâmicos sofrem ruptura de maneira frágil, com pouca ou nenhuma deformação elástica. Apresentam maior resistência à compressão, cuja tendência é de fechar os defeitos; do que a tração, que tende a abrir os defeitos.

Resistência à compressão à temperatura ambiente (RCTA) é uma das propriedades mais importantes dos materiais refratários. É um parâmetro de controle de qualidade da integridade física do material. A resistência mecânica deve ser suficiente para que o manuseio e a aplicação sejam seguros. A exigência de resistência do material vai depender das condições termomecânicas do local de trabalho e da existência de cargas erosivas. Materiais mais porosos apresentam menor RCTA, visto que, de maneira geral, as fraturas têm início em falhas estruturais superficiais (COTTA, 2014).

A presença de vazios no concreto é responsável por grande redução em sua resistência: 5% de vazios podem implicar numa redução de 30% da sua resistência. Os vazios no concreto são provocados por bolhas de ar aprisionado e por espaços originados da remoção de excesso de água (NEVILLE, 2016).

### ***3.3.3 Trabalhabilidade do concreto***

A trabalhabilidade pode ser definida como a propriedade de concretos após mistura – ainda em estado fresco – que determina a capacidade de manuseio e manipulação. Tal propriedade está relacionada com a fluidez, que concebe a facilidade de mobilidade do concreto fresco; e à coesão, que define a resistência à segregação. Também é resultado da combinação das propriedades intrínsecas de seus constituintes, das proporções da mistura e das interações química e físicas entre eles (MHETA & MONTEIRO, 1994).

Com o tempo decorrido a partir da mistura, ocorre a perda de fluidez do concreto fresco principalmente nos primeiros minutos. Esse tempo é muito importante na prática, especialmente para peças pré-moldadas de grande porte, uma vez que define o tempo no qual ainda é possível a moldagem do concreto. O nível de trabalhabilidade exigido do concreto depende da situação de emprego do material (CASTRO, 2007).

A trabalhabilidade está relacionada com a perda de água livre na mistura, hidratação do cimento, reações e evaporação. É um fenômeno normal em todos os concretos. Do ponto de vista reológico, a trabalhabilidade vai depender essencialmente da fluidez e do tempo de pega (tempo de endurecimento). Materiais com curto tempo de pega resultam em um curto período de tempo no qual se é possível trabalhar/moldar. Aditivos retardadores influenciam desacelerando a cinética de reações de hidratação das partículas de cimento e melhorando assim a trabalhabilidade do concreto (CASTRO, 2007).

#### ***3.3.3.1 Fatores que influenciam a trabalhabilidade***

→ *Água*: O principal fator é o teor de água na mistura. A quantidade de água presente na mistura disponibiliza espaços entre as partículas do concreto para que possam fluir. Parte da água do concreto fresco é utilizada para o preenchimento da porosidade entre aglomerantes e agregados, e a parte restante forma um filme d'água sobre a superfície das partículas, contribuindo com a fluidez e trabalhabilidade da mistura. Ao ser otimizado o empacotamento das partículas do concreto, menos água será utilizada para o preenchimento da porosidade entre as partículas, e uma melhor trabalhabilidade será obtida para um teor de água constante. (NEVILLE, 2016).

→ *Agregados*: A trabalhabilidade da mistura está relacionada com a mobilidade das partículas sólidas. Considerando que o teor de água e os outros parâmetros da mistura sejam constantes, a trabalhabilidade é determinada pela dimensão máxima do agregado, sua granulometria, forma e textura superficial. De maneira geral, quanto mais esféricas forem as partículas, maior a facilidade de rolamento umas sobre as outras, de modo que a mistura seja mais trabalhável. Em relação ao tamanho, quanto menor for a dimensão das partículas, maior será a área superficial; e, portanto, maior também será a demanda de água para recobrir a superfície e contribuir com a fluidez da mistura (CASTRO, 2007).

→ *Aditivos*: O efeito dispersante de alguns aditivos químicos possibilita a melhoria na trabalhabilidade de um concreto, ajustando os comportamentos de escoamento, plasticidade, coesão, e viscosidade. Dessa forma, são obtidas misturas bastante fluidas com tensões de escoamento reduzidas e uma melhor mobilidade das partículas (NEVILLE, 2016).

→ *Vibração*: Aplicar uma força vibratória sobre o concreto fresco influencia consideravelmente no aumento da trabalhabilidade e redução da tensão de escoamento. É um método de adensamento do concreto no qual reduz o atrito interno entre as partículas da mistura, movendo-as e permitindo a saída de ar. O grau de adensamento possui forte relação com a resistência mecânica resultante (NEVILLE, 2016). A vibração pode ser feita internamente, na qual o elemento vibrador é imerso no concreto; ou vibração externa, que consiste na aplicação da vibração na superfície. O excesso de vibração deve ser evitado para que não haja segregação do material (CINTRA *et al*, 2013).

#### **3.3.4 Permeabilidade**

A permeabilidade pode ser conceituada como uma decorrência da porosidade do material. É a possibilidade de passagem de um fluido pelo material através do preenchimento dos vazios interconectados do meio poroso. É uma propriedade que se relaciona com a durabilidade de um revestimento refratário, visto que esta depende da facilidade de penetração de fluidos corrosivos no interior do material. A permeabilidade também tem fundamental importância nas etapas de secagem e queima, permitindo adequada evaporação de líquidos sem danificar a estrutura do refratário (RAAD, 2008).

### ***3.3.5 Expansão térmica***

Quando os materiais refratários passam por aquecimento e recebem energia, as ligações entre os átomos se distanciam devido ao aumento das vibrações atômicas. O resultado disso é a expansão térmica, ou seja, o aumento em suas dimensões. Essa dilatação está diretamente relacionada às forças de ligação do material. Conhecer o coeficiente de expansão de cada material é de fundamental relevância para dimensionar as juntas de dilatação no projeto de montagem do revestimento refratário (COTTA, 2014).

Na análise dilatométrica, mede-se a expansão térmica por meio das variações dimensionais sofridas pelo refratário quando submetido a um ciclo de aquecimento definido, com curva de aquecimento programada. A dilatação do corpo de prova é função de seu comprimento inicial ( $C_i$ ) e do comprimento à temperatura de estudo ( $C_f$ ) expressa pela equação  $(C_f - C_i) / C_i$ . (COTTA, 2014).

### ***3.3.6 Condutividade térmica***

A condutividade térmica é um parâmetro que mede a capacidade do material conduzir calor. Como uma das fundamentais exigências dos refratários é a minimização de perdas de calor (energia) durante processos industriais, o estudo da condutividade térmica é importante na determinação do tipo de revestimento ideal para cada equipamento. Baixa condutividade térmica representa um material que possui baixa transmissão de calor, isto é, um material isolante. A condutividade térmica pode ser reduzida com o aumento da porosidade (COTTA, 2014).

O procedimento de medida mais utilizado é o Método do Fio Quente, no qual a condutividade térmica é calculada pelo transiente de temperatura provocado por uma fonte de calor ideal, infinitamente longa e fina num meio material infinito (SANTOS, 2002).

### ***3.3.7 Refratariedade***

A refratariedade é um indicador da capacidade do material resistir às implicações das altas temperaturas sem se fundir completamente. Uma das características dos refratários é de não possuírem um ponto de fusão constante como as substâncias de composição única. A

composição dos refratários é complexa e pode possuir ampla distribuição granulométrica, resultando, pois, em uma estrutura heterogênea. Sendo assim, há partes sólidas com baixos pontos de fusão e outras com altos. Tem-se, então, um ponto inicial de formação de líquido, uma mistura líquido mais sólido e, por fim, um ponto final de fusão. A refratariedade do material indica a sua temperatura de amolecimento (NAKAWAGA, 1998).

A refratariedade é determinada indiretamente pelo ensaio do cone pirométrico equivalente (PCE), conforme a norma ABNT NBR ISO 528:2014. A amostra a ser ensaiada é comparada com o comportamento de cones padronizados com pontos de amolecimento conhecidos. O resultado é o cone padrão cujo vértice toca a base simultaneamente com o cone do material investigado (COTTA, 2014).

### ***3.3.8 Resistência ao choque térmico***

O choque térmico ocorre com a brusca variação de temperatura no aquecimento ou resfriamento. Expor um material a choques térmicos pode causar fissuras e trincas, e deixá-lo mais frágil. A resistência ao choque térmico permite que o refratário passe por repetidas variações na temperatura sem se romper ou sofrer fratura. É uma propriedade influenciada pela condutividade térmica do material. Quanto maior a condutividade, mais homogênea será a distribuição de tensões, e por isso, menor a tensão máxima desenvolvida no sistema (RAAD, 2008).

Os testes para determinação da resistência ao choque térmico variam quanto aos níveis de detalhes. Podem ser feitos tanto com equipamentos de elevada sensibilidade à propagação de trincas, como por ensaios mais simples, que avaliam a interação e evolução de defeitos internos por meio do módulo de elasticidade em materiais submetidos a diversas condições de choque térmico (COTTA, 2014).

### ***3.3.9 Resistência à corrosão***

Os refratários sofrem desgaste químico ocasionado pela corrosão, sendo uma das principais causas para a manutenção dos revestimentos. Dependendo do tipo de equipamento e do processo industrial envolvido, a atmosfera de trabalho pode conter gases e líquidos corrosivos, como exemplo escória, vidro líquido, cinzas e metais fundidos. Esses materiais agressivos

podem alojar-se sobre os revestimentos refratários e reagirem quimicamente com eles, de modo a danificar a superfície do material. A durabilidade do refratário vai, então, estar relacionada com a facilidade dessas substâncias corrosivas infiltrarem em sua estrutura porosa. É desejável para um revestimento refratário que ele seja resistente a essas ações destrutivas (SANTOS, 2008).

A intensidade da interação com o reagente corrosivo e, conseqüentemente, o nível de corrosão, vai depender da composição química do refratário, da textura física (porosidade), das propriedades de fusão, da natureza das ligações e da molhabilidade (SANTOS, 2008).

O principal teste de corrosão por escórias é a escorificação estática, sendo um método de análise comparativa entre duas ou mais amostras. É feito um furo na amostra no qual se insere escória e metal, ou apenas escória. O material é levado para aquecimento a uma temperatura acima das condições de processo. Ao final do teste, há a formação de uma área desgastada pela escória e outra pelo metal (COTTA, 2014).

### ***3.3.10 Resistência à abrasão e erosão***

O material refratário vai estar sujeito a ações agressivas de abrasão e erosão durante seu uso como revestimento. A abrasão é a remoção de material por meio do atrito de material particulado em sua superfície; e a erosão é a perda progressiva de material quando em contato com fluidos em movimento. Esses mecanismos de desgaste influenciam na vida útil do revestimento refratário. Geralmente, refratários com alta densidade e resistência térmica apresentam boa resistência à abrasão e erosão (SANTOS, 2008).

A análise da resistência à abrasão é feita com base na perda de massa da amostra quando submetida a um fluxo de material particulado (carbetos de silício) com certo ângulo de jateamento (normalmente 45° ou 90°) (COTTA, 2014).

### ***3.3.11 Tempo de pega***

O tempo de pega representa a passagem do concreto do estado plástico ao estado rígido, causada pelo processo de hidratação do cimento. Após o tempo de pega, o concreto enrijecido já não pode mais ser trabalhado. De modo geral, quanto maior a temperatura ambiente, mais acelerada

será a pega do concreto. Aditivos podem ser utilizados para acelerar ou retardar a pega e, assim, o tempo disponível para a moldagem do concreto (NEVILLE, 2016).

### **3.3.12 Coesão**

A coesão é uma propriedade muito ligada à trabalhabilidade do concreto, sendo que um concreto coeso apresenta-se homogêneo e sem separação de materiais da mistura. A coesão está diretamente relacionada à proporção das partículas finas na mistura (GEYER, 2006).

### **3.3.13 Segregação**

A segregação é prejudicial à resistência mecânica do material e consiste na separação dos componentes do concreto. A mistura deixa de ser homogênea com distribuição uniforme, e as partículas mais grossas passam a concentrar-se no fundo (CASTRO, 2007).

As principais causas são as diferenças entre as dimensões das partículas, diferença entre as densidades da matriz e dos agregados, e excesso de vibração durante a moldagem. A proporção entre agregado e matriz também influencia na segregação, sendo que, quanto mais baixo o teor da matriz no concreto, maior será a disposição à segregação (RAAD, 2008).

Há duas formas de segregação: a primeira, na qual as partículas maiores se separam devido à maior tendência de se assentarem; e a segunda – também conhecida como exsudação – que a água da mistura tende a se elevar à superfície do concreto. Isto ocorre em misturas com excesso de água (NEVILLE, 2016).

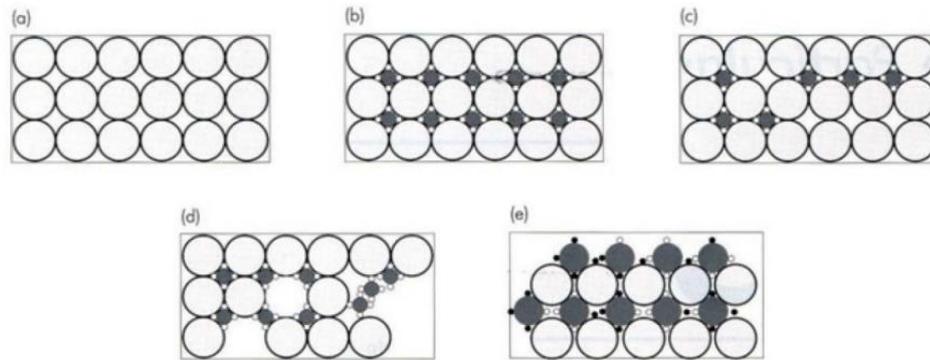
## **3.4 Distribuição Granulométrica**

Granulometria é a análise da distribuição das diferentes dimensões das partículas componentes da mistura cerâmica. A distribuição granulométrica dos concretos é composta por duas ou mais composições. Para se conseguir altas densidades, utiliza-se da otimização do *empacotamento de partículas*, no qual os espaços vazios (interstícios) entre as partículas maiores são preenchidos por partículas menores, e assim por diante. Desse modo, diminui-se a porosidade do sistema. É importante um bom arranjo granulométrico no concreto, para alcançar uma

melhor compactação e menor índice de vazios, otimizando assim as propriedades físicas e mecânicas (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

A distribuição granulométrica pode ser descontínua ou contínua. Quando se tem uma distribuição descontínua, observa-se a ausência de determinados tamanhos de partículas em sua distribuição. E quando a distribuição granulométrica é contínua, a faixa de distribuição de tamanhos é contínua em toda a sua extensão. A eficácia do empacotamento de partículas é influenciado pela distribuição granulométrica (figura 6) (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

**Figura 6 – Efeito da quantidade e do tamanho das partículas no empacotamento.**



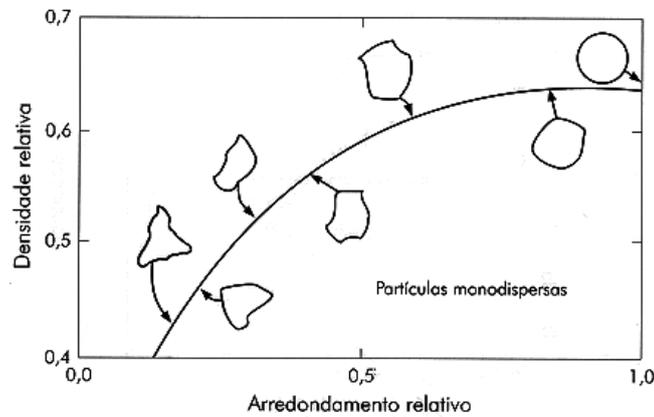
Fonte: PANDOLFELLI *et al*, 2000.

(a) sistema monodisperso; (b) máxima densidade de empacotamento teórica; (c) deficiência de partículas pequenas; (d) deficiência de partículas grandes; (e) distribuição inadequada de tamanho de partículas.

### **3.4.1 Fatores que influenciam o empacotamento de partículas**

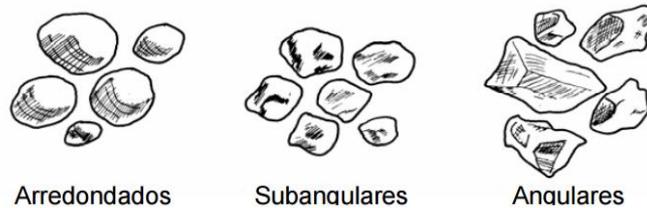
A *morfologia* é uma característica das partículas que pode alterar a condição de empacotamento do sistema. De modo geral, quanto mais irregulares forem os formatos, menor será a eficiência do empacotamento. Isso acontece devido à fricção entre as partículas no contato de suas superfícies irregulares e às considerações geométricas. A figura 7 ilustra esse comportamento de que, à medida que as partículas aproximam-se da morfologia esférica, maior é a densidade de empacotamento. E a figura 8 ilustra os tipos de morfologia dos grãos (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

**Figura 7 – Relação qualitativa da densidade relativa e o arredondamento relativo para empacotamentos monodispersos aleatórios de partículas.**



Fonte: PANDOLFELLI *et al*, 2000.

**Figura 8 – Morfologia de grãos.**



Fonte: PANZERA, 2007.

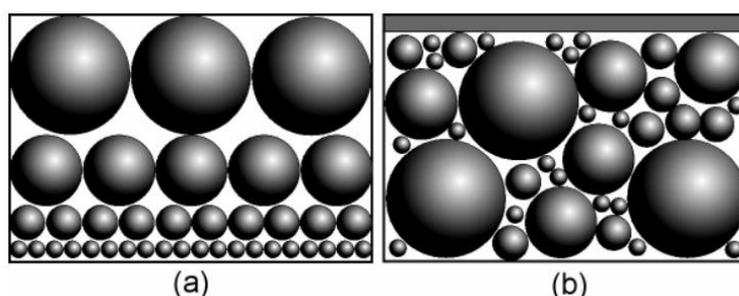
A *porosidade* também é um fator de influência: para um melhor empacotamento, as partículas devem apresentar a menor porosidade possível. A porosidade aberta proporciona formato irregular às partículas e também aumentam a demanda por água em virtude de absorverem maior quantidade de líquido por entre os poros (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

O empacotamento da mistura também pode ser prejudicado pela acentuada diferença de *densidade* entre seus componentes, de modo que o processo de compactação deve ser cuidadoso para evitar possíveis segregações e depreciação da performance do material. O importante não é o valor da densidade da partícula em si, mas sim a diferença de densidade entre agregados e matriz (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

Esses fatores dizem respeito às características do sistema de partículas, mas, para que se consiga atingir o máximo de empacotamento possível, deve-se colocá-las em posições em que as partículas menores ocupem os interstícios das maiores com a devida técnica de compactação.

Isso significa dizer que a mesma dispersão granulométrica pode gerar diferentes empacotamentos, de acordo com a técnica de compactação utilizada e a sequência de deposição das partículas. A figura 9 ilustra duas situações de mesma granulometria porém distribuídas de maneiras distintas (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

**Figura 9 – Modelos esquemáticos que apresentam duas formas de empacotamento para uma mesma distribuição granulométrica.**



(a) camadas monodispersas; (b) empacotamento aleatório submetido a vibração. A faixa cinza em (b) representa a redução no espaço ocupado pelas partículas devido ao melhor empacotamento.

Fonte: PANDOLFELLI *et al*, 2000.

### ***3.4.2 Efeito da distribuição granulométrica sobre as propriedades reológicas de concretos refratários***

Os concretos refratários possuem distribuições granulométricas do tipo extensa, que é composta tanto por partículas pequenas (matriz) quanto por partículas grandes (agregados). A distribuição geralmente é de 0,1  $\mu\text{m}$  a 10 mm. Na matriz, predominam os fenômenos de superfície e nos agregados os fenômenos de massa; portanto, nos concretos estarão presentes ambos os domínios de força (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

O valor de fluidez do concreto está diretamente relacionado com a matriz da mistura. Com baixo teor de matriz, maior será o contato entre os agregados e a dificuldade espacial de movimentação entre os mesmos, gerando menor fluidez. Ao aumentar a quantidade de matriz, diminuem os contatos entre os agregados e o atrito interno do concreto; a fluidez é, então, regida pela viscosidade da matriz. Ou seja, o aumento da matriz (partículas finas) ajuda na movimentação dos agregados, tendo atuação semelhante a um lubrificante entre as partículas maiores (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

Partículas muito finas possuem forte tendência à aglomeração devido às forças coesivas resultantes da relação entre a área superficial e o volume (massa). Os aglomerados dessas partículas podem elevar o diâmetro mínimo do sistema, causando o efeito inverso ao esperado quando se adiciona partículas finas. Além disso, os aglomerados assemelham-se a partículas ocas que demandam maior teor de água para a mistura e originam poros na microestrutura, prejudiciais à resistência mecânica dos produtos finais. Geralmente, para sanar o problema de aglomeração e para se otimizar o empacotamento, é necessário adicionar dispersantes que inibam as forças atrativas entre as partículas (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

### **3.5 Dispersão de partículas nos concretos refratários**

A matriz dos concretos refratários é uma suspensão coloidal, resultado da adição de pós finos a um líquido. Conforme comentado na seção anterior, um problema muito comum – também observado em sistemas secos – é que essas partículas finas têm forte tendência à aglomeração, comprometendo o estado de dispersão das partículas e o comportamento reológico das suspensões, que, por sua vez, influenciam de forma desvantajosa no processo de moldagem (PANDOLFELLI *et al*, 2000).

Em uma suspensão considerada estável, as forças repulsivas entre as partículas devem ser maiores do que as forças de atração de van der Waals. Quando as forças de atração são mais intensas, a floculação do sistema é favorecida. No interior da estrutura desses flocos, ocorre o aprisionamento de boa parte da água presente na mistura. Essa água fica indisponível para promover o fluxo da suspensão e a viscosidade da mistura aumenta, dificultando os processos de transporte e conformação (ORTEGA, 1997).

Para a obtenção de suspensões com alta concentração de sólidos, e baixa viscosidade, utilizam-se os dispersantes (ou defloculantes): aditivos que provocam uma dispersão mais estável e evitam a aglomeração de partículas finas. O objetivo dos dispersantes é aumentar a distância entre as partículas de uma suspensão no intuito de inibir a aglomeração entre as mesmas. Evitando a formação de grande quantidade de flocos, a água já não é mais aprisionada nesses aglomerados e torna-se disponível para promover o fluxo das partículas e a viscosidade do material diminui. A partir desse princípio, ainda é possível a utilização de maiores concentrações de sólido, e/ou redução da quantidade de água necessária para atingir bons níveis de trabalhabilidade do concreto. Sabe-se que uma menor quantidade de água aumenta a

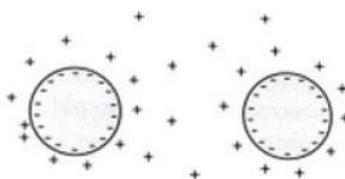
resistência mecânica do cimento e possibilita que os corpos conformados apresentem baixas retrações de secagem e de queima. Assim sendo, suspensões dispersas garantem boas propriedades reológicas e mecânicas dos concretos (ORTEGA, 1997).

Por reduzirem a água necessária à mistura, o tamanho dos poros e a quantidade de ar aprisionado são reduzidos, provocando uma microestrutura mais densa no estado endurecido. Cada dispersante tem uma concentração ideal, e a adição em excesso pode provocar um efeito negativo na sedimentação da suspensão. Alguns exemplos de dispersantes são ácidos polieletrólitos, carboxilatos, sulfatos, sulfonatos, ésteres de fosfatos, policarboxilatos, etc. (LINK, 2013; CHABAS *et al*, 2013).

O fenômeno de repulsão das partículas, segundo PANDOLFELLI *et al* (2000), pode ser explicado por meio de três mecanismos de repulsão: repulsão eletrostática, repulsão estérica e repulsão eletroestérica, explanadas a seguir:

- Estabilização eletrostática: surgimento de cargas elétricas na partículas como consequência da interação da superfície com o meio líquido, esquematizado na figura 10.

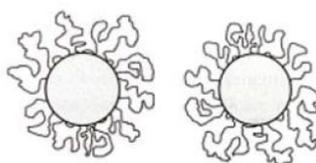
**Figura 10 – Estabilização por cargas nas superfícies das partículas.**



Fonte: PANDOLFELLI *et al*, 2000.

- Estabilização estérica: adsorção na superfície de polímeros de longas cadeias que bloqueiam a aproximação das partículas por meio do impedimento físico (mecânico), esquematizado na figura 11.

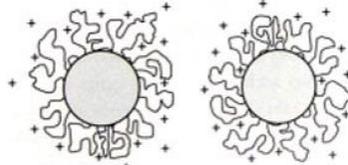
**Figura 11 – Estabilização por meio de adsorção de polímeros.**



Fonte: PANDOLFELLI *et al*, 2000.

- Estabilização eletroestérica: combinação dos dois mecanismos anteriores. É a adsorção específica de moléculas com grupos ionizáveis ou polieletrólitos na superfície das partículas. Os íons originários da dissociação desses grupos ionizáveis somam uma barreira eletrostática ao efeito estérico, esquematizado na figura 12.

**Figura 12 – Estabilização por adsorção de moléculas ionizadas ou polieletrólitos.**

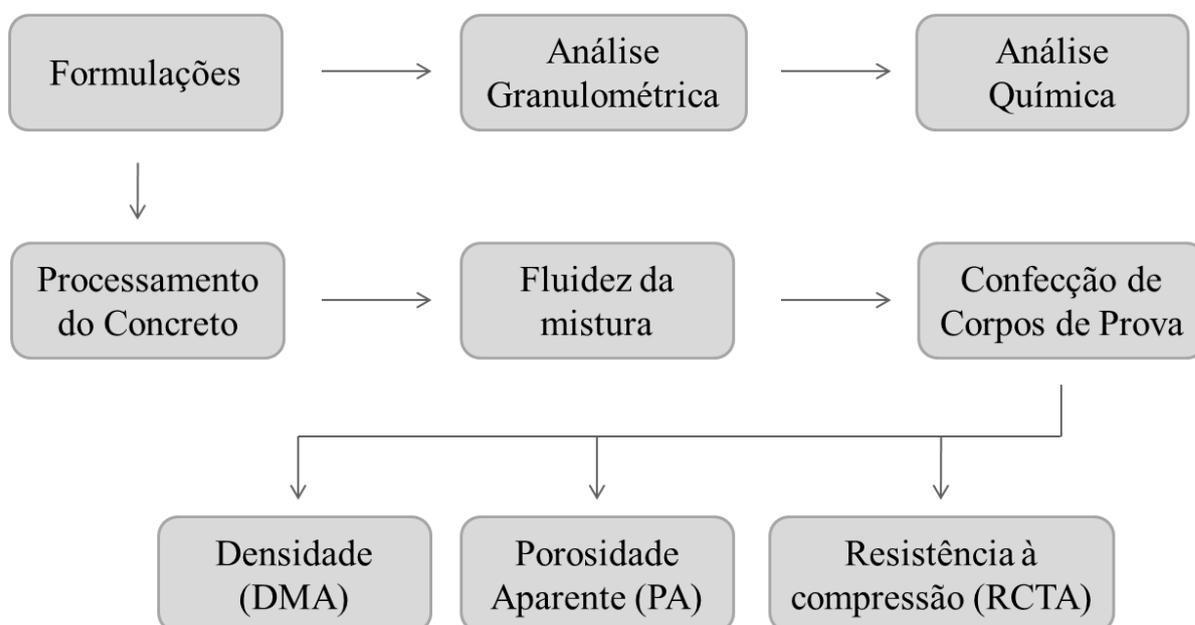


Fonte: PANDOLFELLI *et al*, 2000.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da influência da granulometria e percentual de dispersante nas propriedades de concretos à base de alumina foi baseada na metodologia ilustrada na figura 13. As formulações estudadas passaram por análises granulométricas e químicas. Posteriormente foram misturadas com água e feito o teste de fluidez. Depois foram feitos corpos de prova para testes de densidade, porosidade aparente e resistência à compressão.

**Figura 13 – Metodologia proposta para estudo da influência da granulometria e percentual de dispersante nas propriedades de concretos refratários.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 4.1 Materiais

Os materiais utilizados nas formulações dos concretos refratários estão listadas na tabela 1 a seguir.

**Tabela 1 – Especificações das matérias-primas utilizadas nos concretos.**

<b>Matéria-Prima</b>	<b>Especificações</b>	<b>Fornecedor</b>
Alumina Sinterizada Tabular	12,5/6,3 mm, 6,7/3,35 mm, 3,35/1,18 mm, 1,18mm/ 600µm, < 600 µm e < 45 µm	Almatis
Alumina Calcinada	CL-370	Almatis
Sínter MgO	M30B < 300 µm	Magnesita
Microsílica	971 D	Elken
Cimento de Aluminato de Cálcio	Secar – 71	Lafarge
Dispersante polimérico	Castament-FS 20	BASF Corporation

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

## 4.2 Formulações

O concreto refratário em estudo foi do sistema  $Al_2O_3$ -MgO, com aproximadamente 95% de alumina. Para a análise da influência granulométrica, foram estudadas duas granulometrias distintas, G1 e G2. A primeira (G1) com teor de agregados de 60%, e a segunda (G2) com 40%.

Para cada granulometria, foram feitas quatro prévias com diferentes quantidades de aditivo dispersante. A primeira formulação sem adição de dispersante, a segunda com 0,025%, a terceira com 0,050% e a quarta com 0,075%. No total foram feitas oito prévias, resumidas na tabela 2.

**Tabela 2 – Formulação das prévias estudadas.**

<b>Prévias</b>	<b>Granulometria</b>	<b>% Dispersante</b>
P1	G1	Sem adição de dispersante
P2		0,025%
P3		0,050%
P4		0,075%
P5	G2	Sem adição de dispersante
P6		0,025%
P7		0,050%
P8		0,075%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O dispersante utilizado (Castament FS-20) é um produto polimérico a base de polietileno glicol, utilizado em materiais refratários de baixo e ultra baixo teor de cimento (CAC), cuja estabilização é do tipo eletroestérica.

#### ***4.2.1 Análise Granulométrica***

A determinação granulométrica das prévias foi realizada no peneirador mecânico ROTAP com frequência de oscilação de  $290 \pm 20$  ciclos/min e golpe rítmico de  $30 \pm 3$  mm de queda a cada duas oscilações. O conjunto de malhas de peneiras utilizado foi: 8,00 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,70 mm, 1,00 mm, 600  $\mu\text{m}$ , 212  $\mu\text{m}$  e 75  $\mu\text{m}$ .

Para garantir um peneiramento eficiente sem que as partículas muito finas aglomerem-se durante o procedimento e interfiram na determinação granulométrica, a amostra de 1000 g foi lavada com água na peneira mais fina do jogo utilizado até que a água residual saísse translúcida. O material retido na lavagem foi seco e pesado novamente.

O jogo de peneiras foi montado de modo que a peneira de malha mais grossa estivesse no topo do conjunto, conforme a figura 14. A amostra foi colocada na peneira do topo e ligou-se o

peneirador mecânico por 10 minutos. Após o peneiramento, removeu-se os conjuntos do peneirador e realizou-se a pesagem.

**Figura 14 – Peneirador mecânico e respectivo conjunto de peneiras.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### ***4.2.2 Análise Química***

Para análise química, uma amostra de 100 g de cada granulometria (G1 e G2) foi avaliada no espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) utilizando o software SUPERQ. Esse método de análise objetiva determinar os elementos presentes nos minerais refratários, e por meio de curvas comparativas, avaliar os teores de óxidos correspondentes.

#### **4.3 Processamento do Concreto**

O aditivo dispersante utilizado (Castament FS-20) foi adicionado nas respectivas proporções das prévias ainda secas. Cada prévia de 12 kg foi misturada na bateadeira planetária Irmãos Amadio modelo LA 20L capacidade de 20 litros (figura 15).

As prévias foram misturadas por um minuto na velocidade lenta a fim de homogeneizar a massa seca, e adicionou-se a água lentamente. Depois, na velocidade rápida, misturou-se por mais quatro minutos.

**Figura 15 – Batedeira Amadio modelo 20 LA.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A quantidade de água necessária para as prévias iniciais (sem dispersante) foi baseada no percentual de água já utilizado para as marcas comerciais correspondentes aos concretos utilizados, observando-se o aspecto do concreto no momento da mistura. Para as prévias posteriores, nas quais acrescentou-se dispersante, manteve-se fixo o teor de água determinado para que o percentual de água fosse um parâmetro constante na análise das propriedades.

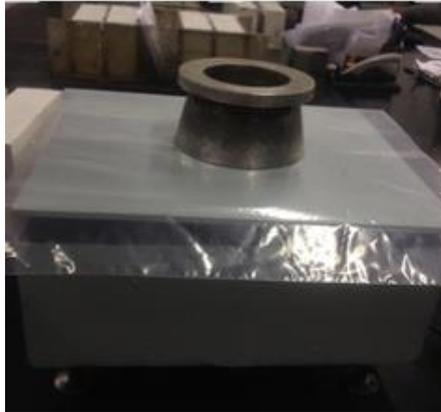
#### **4.4 Fluides da Mistura**

Não existe um ensaio que determine diretamente a trabalhabilidade do concreto. Mas o teste de fluidez fornece informações úteis, com certa variação, sobre a trabalhabilidade e sobre a capacidade de escoamento do material. A fluidez dos concretos foi avaliada conforme a norma ABNT-NBR-13320 (materiais refratários - determinação da fluidez de concretos refratários convencionais e concretos de fluência livre).

Para a realização do teste de fluidez, foi utilizado um molde metálico de tronco de cone (diâmetro superior igual a 70 mm, diâmetro inferior igual a 100 mm e altura de 60 mm) que fica no centro de uma mesa vibratória, ilustrado na figura 16.

A amostra foi coletada logo após o processo de mistura, e preencheu-se o cone com o concreto com o auxílio de uma espátula. O cone foi retirado e ligou-se a mesa vibratória por trinta segundos. Em seguida, mediu-se com o paquímetro três pontos diferentes; buscando o diâmetro maior, o menor e o intermediário; e calculou-se a média das medidas. Como a base do cone é de 100 mm, um valor encontrado de fluidez de 100 mm significa que o material não fluiu.

**Figura 16 – Cone de fluidez e mesa vibratória.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Foram realizados testes de fluidez a cada cinco minutos, por um período de 30 minutos após mistura, para a análise da fluidez e trabalhabilidade do concreto com o passar do tempo.

#### **4.5 Confeção de Corpos de Prova**

Tendo como referência a norma ABNT-NBR-8382 (preparação de corpos de prova de concretos para projeção, concretos isolantes, densos e de fluência livre), foram confeccionados seis corpos de prova para cada prévia para realização dos testes posteriores. A dimensão dos corpos de prova foi 230 x 60 x 60 mm.

Os corpos de prova ficaram no molde para cura ao ar por 24 horas e depois desmoldados. Foram secos em estufa a 110 °C por 18 horas, e metade das amostras passaram por posterior queima a 1500 °C. A figura 17 a seguir ilustra o procedimento.

**Figura 17 – Confeção dos corpos de prova.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### 4.6 Densidade Aparente (DMA) e Porosidade Aparente (PA)

Para a realização dos testes de DMA e PA, segundo a norma ASTM C373, o corpo de prova foi pesado, representando sua massa seca ( $m_s$ ). Imergiu-se a amostra em um recipiente contendo água por duas horas e mediu-se, utilizando o prato suspenso da balança, a massa imersa após a saturação ( $m_i$ ). Recolheu-se a amostra do líquido, e com uma flanela retirou-se o excesso de água. Pesou-se, então, o corpo de prova saturado ( $m_u$ ).

Com essas medidas, calculou-se a densidade (DMA) e porosidade aparente (PA) por meio das equações 1 e 2:

$$DMA \text{ (g/cm}^3\text{)} = \left( \frac{m_s}{m_u - m_i} \right) \times \rho_{\text{água}} \quad (1)$$

$$PA \text{ (\%)} = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \times 100 \quad (2)$$

$m_s$  = massa seca (g);

$m_u$  = massa úmida (g);

$m_i$  = massa imersa após a saturação (g);

$\rho_{\text{água}}$  = densidade da água (g/cm<sup>3</sup>)

Os testes foram realizados em ambos os corpos de provas secos a 100 °C e queimados a 1500°C.

#### 4.7 Resistência à Compressão à Temperatura Ambiente (RCTA)

A RCTA foi medida de acordo com a norma ABNT NBR-11222 (materiais refratários densos não-conformados - determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura ambiente). Primeiramente, foi conferida a planicidade dos corpos de prova para então realizar o teste na máquina Kratos EVT 100 t com célula de carga de 100.000,0 kgf e aceleração de 200,0 kgf/cm<sup>2</sup>s (figura 18).

**Figura 18 – Teste de RCTA.**

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A resistência (RCTA) foi expressa em Megapascal (MPa), calculada por meio da equação 3 a seguir:

$$RCTA = \frac{P}{A} \quad (3)$$

P = Carga atingida no momento da ruptura (N);

A = Área de trabalho (mm<sup>2</sup>).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Granulometria

O resultado do teste de granulometria é mostrado na tabela 3. O concreto com granulometria G1 apresenta 40% de matriz em sua composição; e o concreto de granulometria G2, 60%. A diferença existente entre a granulometria dos dois concretos causa diferenças entre suas propriedades.

**Tabela 3 – Resultado das granulometrias G1 e G2.**

Diâmetro	G1 (%)	G2 (%)
> 8 mm	3	4
> 2,36 mm	43	16
> 600 µm	14	20
< 600 µm	40	60

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 5.2 Análise Química

O resultado da análise química das duas formulações (G1 e G2) estão relacionados na tabela 4. Apesar de possuírem diferentes distribuições granulométricas, as matérias-primas são as mesmas, e por isso, já era esperado que o percentual de óxidos presentes na composição de cada um fosse similar.

**Tabela 4 – Resultado da análise química por fluorescência de raios X das prévias.**

Formulações	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO(%)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	Outros (%)
G1	93,01	5,53	0,26	0,92	0,21	0,07
G2	93,35	5,20	0,28	0,88	0,21	0,08

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 5.3 Processamento do Concreto

O percentual mínimo de água para a primeira prévia, P1 (granulometria G1), foi de 5,2%. Menor quantidade de água não proporcionou o ponto de viragem, que é a transição para o estado fluido, necessária para o processamento adequado do concreto.

O teor de água utilizado deveria manter-se fixo para que não fosse uma variável de influência nas demais propriedades. No entanto, ao se utilizar a mesma quantidade nas prévias contendo dispersante (P2 a P4), estas obtiveram fluidez excessiva, impossibilitando a moldagem e avaliação das propriedades. Portanto, utilizou-se apenas o necessário de água, que foi de 4,0%; e fixou-se esse valor de acordo com a tabela 5.

Segundo estudos de Castro (2007), quanto menores forem as dimensões das partículas, correspondendo a maior área superficial, maior a demanda de água para preencher os vazios causados entre as mesmas e para recobrir a superfície das partículas. Isso impossibilita boa parte da água de contribuir com a fluidez da mistura. Para a granulometria G2, já era esperado que o teor de água utilizado não fosse o mesmo que em G1, justamente pela maior presença de partículas finas em sua composição. O necessário de água encontrado para hidratar a superfície das partículas e fluidificar a mistura foi de 7,5%.

O mesmo comportamento em G1 foi observado em G2. O percentual de água utilizado na primeira prévia (P5) não se aplicou para as demais as quais continham dispersante. O teor necessário para P6 a P8 foi de 6,0%.

**Tabela 5 – Teor de água utilizado nas prévias.**

Prévias	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
% Água	5,2	4,0	4,0	4,0	7,5	6,0	6,0	6,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Como não foi possível fixar a quantidade de água utilizada nas misturas dentro da mesma granulometria, as prévias sem dispersantes (P1 e P5) não foram levadas em consideração a fim de que a água não fosse um parâmetro de interferência nos resultados das propriedades das prévias de mesma distribuição granulométrica.

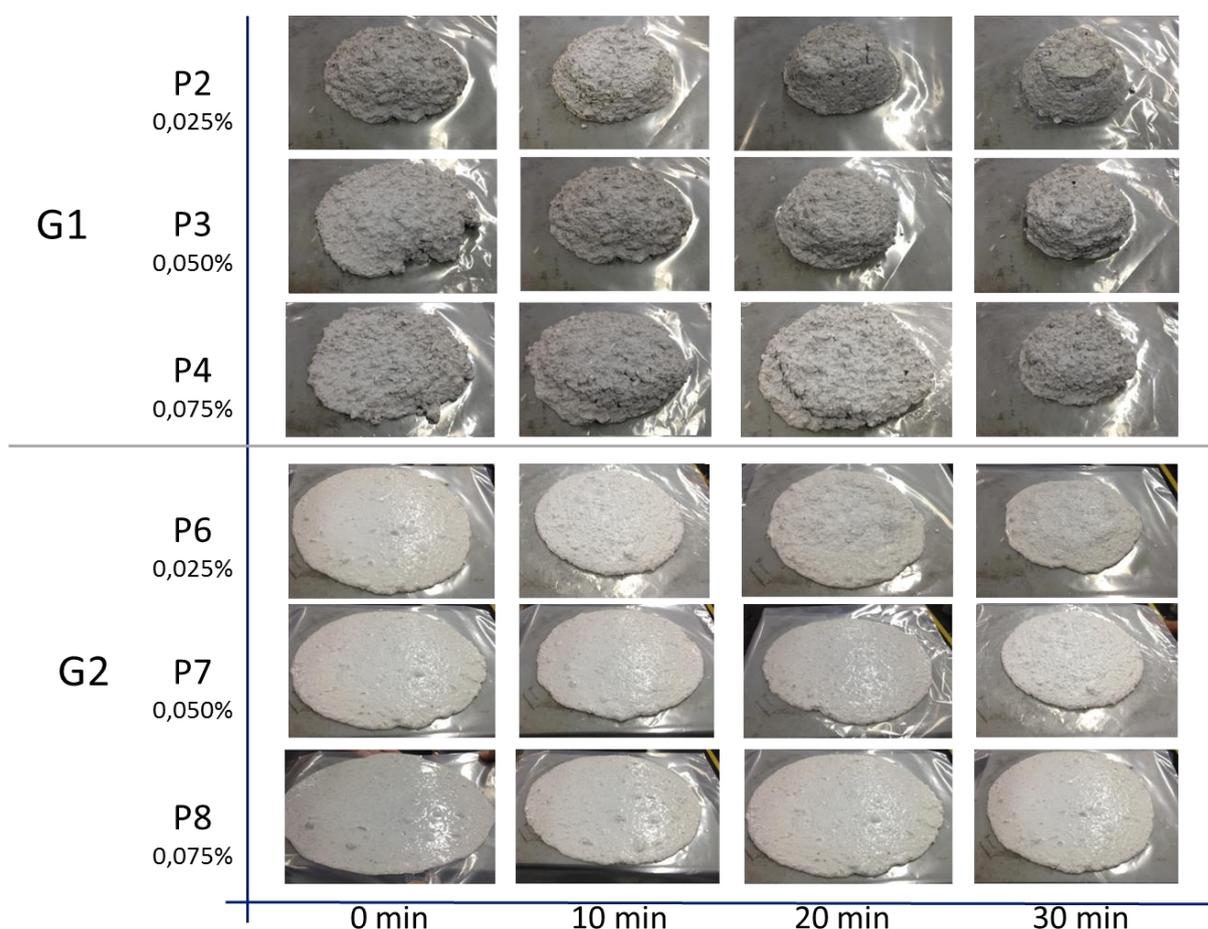
#### **5.4 Fluidez e trabalhabilidade**

Os resultados das médias de fluidez das prévias estão apresentado na tabela 6, e ilustrado na figura 19.

**Tabela 6 – Fluidez (mm) das prévias com o passar do tempo.**

Prévias / Tempo	P2	P3	P4	P6	P7	P8
0 min	172	195	250	255	272	302
5 min	130	172	238	240	263	295
10 min	125	150	235	235	255	270
15 min	118	132	220	221	247	271
20 min	110	123	210	210	230	260
25 min	110	113	182	207	222	256
30 min	105	110	140	190	210	255

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Figura 19 – Fluidez das prévias com o passar do tempo.**

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A granulometria é o primeiro fator que deve ser levado em consideração na análise dos valores obtidos. Segundo Amaral (2009), a fluidez do concreto no estado fresco está diretamente

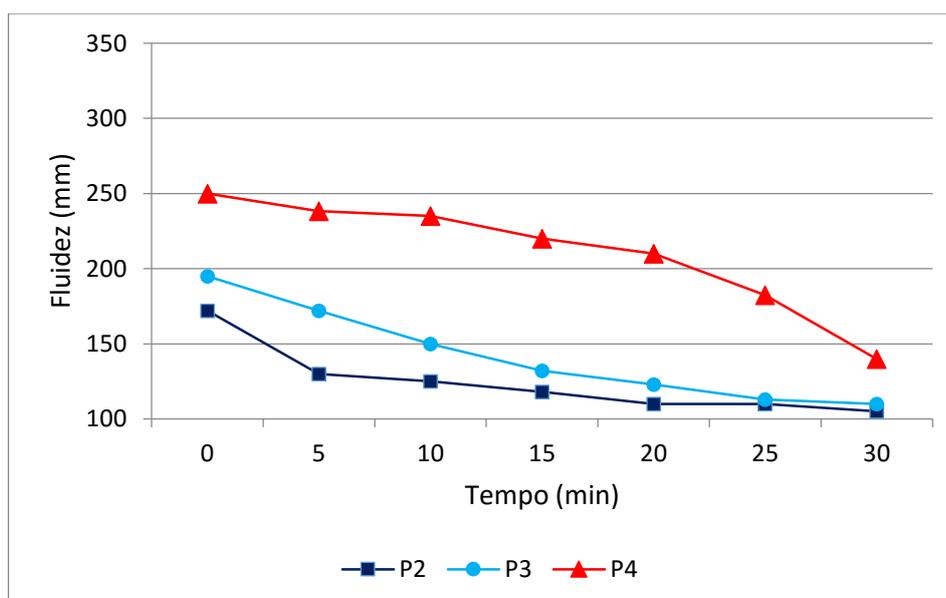
relacionada com o teor de matriz e água da mistura, uma vez que estes são os responsáveis por preencherem os espaços vazios entre os agregados, reduzindo o atrito entre eles e assim permitindo o fluxo de movimentação.

Como a formulação de G2 (P6 a P8) inclui maior percentual de matriz e de água, obteve-se maior fluidez que G1 (P2 a P4). As prévias de G2 apresentaram fluidez, em média, 35% maior que G1 após a mistura, e 85% maior após 30 minutos. A moldagem dos corpos de prova de G2 foram facilitadas pela menor resistência ao escoamento, dispensando inclusive a necessidade de vibração intensa.

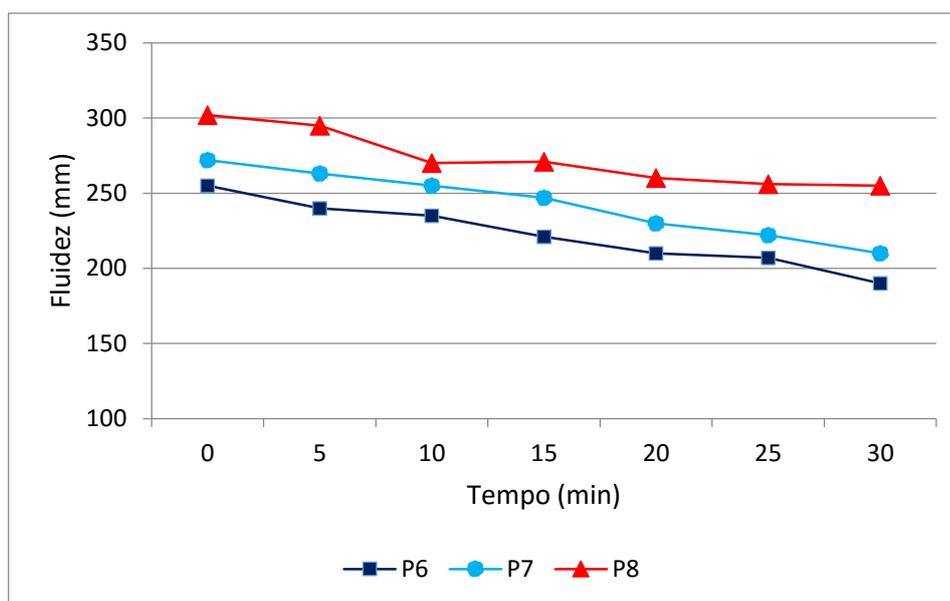
Considerando o estado de dispersão das partículas, segundo Ortega (1997), em um sistema onde há floculação das partículas, boa parte da água da mistura é aprisionada no interior dos aglomerados, deixando de contribuir efetivamente com o fluxo da mistura. O aditivo dispersante melhora as propriedades reológicas (viscosidade e fluidez) dos concretos justamente pela desaglomeração das partículas.

As figuras 20 e 21 foram construídas com base nos valores obtidos de fluidez com o passar do tempo a partir do momento da mistura do concreto.

**Figura 20 – Fluidez versus tempo após mistura das prévias de G1.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Figura 21 – Fluidez versus tempo após mistura das prévias de G2.**

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Observa-se que a adição de dispersantes permitiu um aumento na fluidez das prévias, que permaneceram mais estáveis por um período maior de tempo; isto é, o dispersante melhorou a trabalhabilidade das amostras. Tal comportamento é explicado nos estudos de Oliveira (2007), que mostram como o aditivo dispersante combina alta fluidez e adequado tempo de trabalhabilidade (por volta de 30 minutos). Sendo assim, é facilitada a etapa de aplicação do concreto - agora trabalhável por mais tempo. Esse tempo é muito importante na prática, pois define o período no qual ainda é possível a moldagem do concreto.

### 5.5 Densidade Aparente (DMA), Porosidade Aparente (PA) e Resistência à Compressão à Temperatura Ambiente (RCTA)

Os resultados de densidade, porosidade e resistência mecânica das amostras secas a 110 °C e queimadas a 1500 °C estão relacionados na tabela 7.

**Tabela 7 – DMA e PA das amostras secas a 110 °C e queimadas a 1500 °C. (continua)**

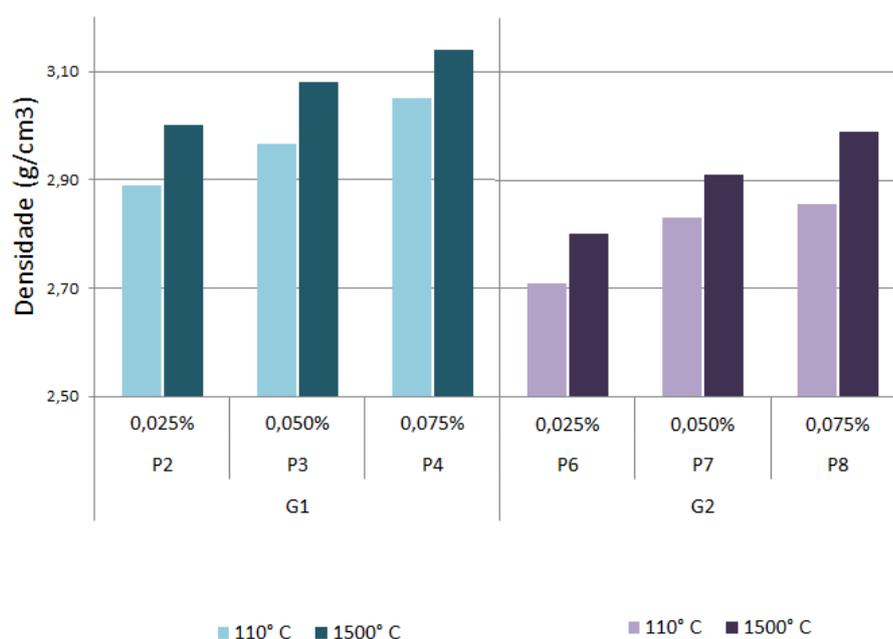
Prévias	110 °C			1500 °C		
	DMA (g/cm <sup>3</sup> )	PA (%)	RCTA (MPa)	DMA (g/cm <sup>3</sup> )	PA (%)	RCTA (MPa)
P2	2,89	20,5	16	3,00	16,4	47
P3	2,97	18,1	32	3,08	12,9	70
P4	3,05	16,3	40	3,14	11,6	78

**Tabela 7 - DMA e PA das amostras secas a 110 °C e queimadas a 1500 °C. (continuação)**

Prévias	110 °C			1500 °C		
	DMA (g/cm <sup>3</sup> )	PA (%)	RCTA (MPa)	DMA (g/cm <sup>3</sup> )	PA (%)	RCTA (MPa)
P6	2,71	26,7	8	2,77	20,4	30
P7	2,83	23,1	10	2,88	18,4	52
P8	2,86	21,3	17	2,97	14,6	65

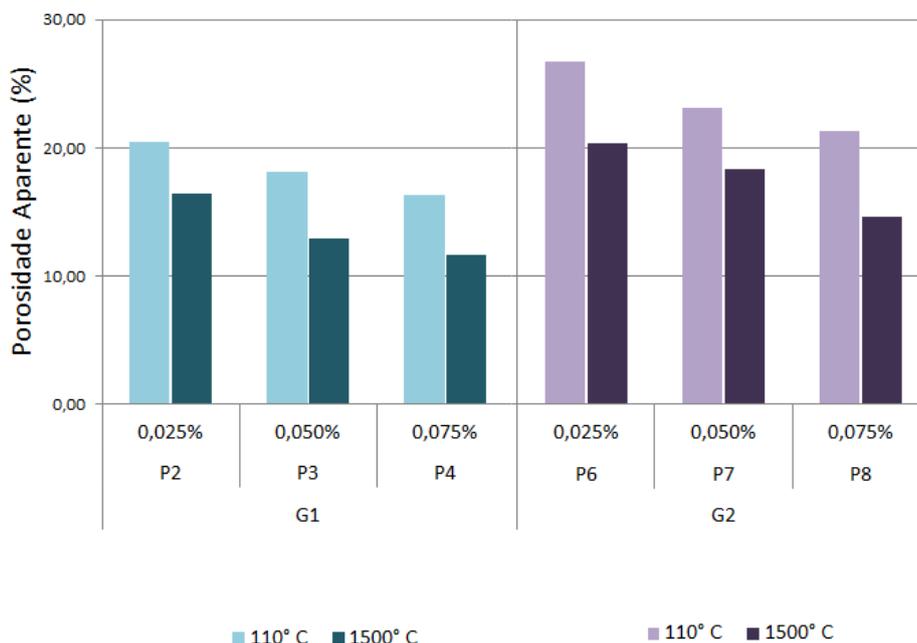
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Porosidade e densidade são propriedades inversamente relacionadas. As amostras com menores índices de porosidade são também as estruturas mais densas, conforme representado nas figuras 22 e 23. Segundo Cotta (2014), a porosidade é utilizada como parâmetro no controle de qualidade de fabricação. Os poros abertos aumentam a probabilidade de interação do material com agentes químicos a altas temperaturas, provocando maior desgaste. Portanto, as amostras com menor porosidade (e maior densidade) têm maior probabilidade de boa performance na operação por mais tempo sem necessidade de manutenção.

**Figura 22 - Densidade das prévias das granulometrias G1 e G2 a 110 °C e 1500 °C.**

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

**Figura 23 - Porosidade das prévias das granulometrias G1 e G2 a 110 °C e 1500 °C.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

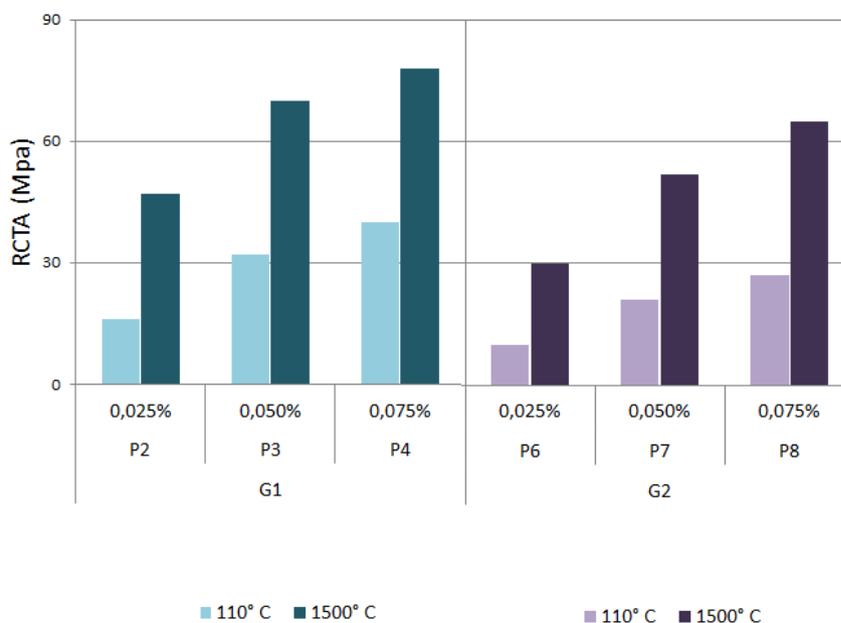
As prévias das granulometrias G1 e G2 demandaram teores de água distintos (4,0% e 6,0% respectivamente) devido às particularidades de cada sistema granulométrico. Tal fato é determinante nas referentes propriedades. Pode-se observar que as prévias de G2 (P6 a P8) apresentaram maior porosidade, e isso é reflexo direto da maior quantidade de água necessária à viragem do concreto. Durante a cura e secagem dos corpos de prova, ocorre a remoção desse excesso de água presente na mistura, originando espaços vazios no concreto endurecido (porosidade). As prévias de G2 tiveram aumento, em média, de 30% da porosidade em relação a G1. O resultado obtido comprova que, para maiores teores de água, maior a porosidade do material.

Fazendo a comparação entre as prévias da mesma granulometria, preparadas com teor fixo de água, a influência é apenas da adição do dispersante. O dispersante permite que a água ofereça mais fluidez na mistura, de modo a facilitar a movimentação das partículas. Isso resultou na otimização do adensamento do sistema, gerando um concreto com maior empacotamento das partículas na preparação dos corpos de prova. Entre P6 e P8, e P2 e P4 (acrécimo de 0,05% de dispersante), teve-se redução, em média, de 5% de porosidade aparente. Portanto, à medida que se aumenta o percentual de dispersante, menor a porosidade e maior a densidade.

Depois da etapa de secagem, os corpos de prova que passaram por queima a 1500 °C sofreram sinterização. Nesse fenômeno, ocorre a difusão de material no intuito de reduzir a energia superficial do sistema. O resultado é um material mais denso e menos poroso, e por isso mais resistente; consequências esperadas no processo de sinterização de pós conformados. Isso pode ser observado quando se compara as amostras secas a 110 °C com as queimadas a 1500 °C. Após o tratamento térmico, ambos os sistemas tiveram melhorias nas propriedades, como pode ser observado nas figura 22 e 23.

Materiais mais porosos também apresentam menor RCTA, visto que, de maneira geral, as fraturas iniciam-se em falhas estruturais superficiais. As prévias de G1, que apresentaram menor porosidade em relação a G2, resultaram em maiores valores de resistência (figura 24). As prévias de G2 tiveram, em média, redução de 58% na resistência a 110 °C e 26% a 1500 °C. As prévias da mesma granulometria, tiveram aumento de 98%, em média, comparando a menor com a maior adição de dispersante. Esses resultados corroboram com estudos de Cotta (2014), no qual a porosidade tem relação direta com a resistência.

**Figura 24 – Resistência à compressão das prévias das granulometrias G1 e G2 a 110 °C e 1500 °C.**



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados práticos da análise da granulometria e do estado de dispersão das partículas dos concretos refratários como fatores de influência no que se refere às características de processamento e manuseio, e de comportamento mecânico e vida útil, mostraram-se concordantes com os previstos de acordo com a literatura revisada.

Ao variar a distribuição granulométrica das prévias, a composição G2 com maior percentual de matriz (partículas finas) apresentou maior área superficial, cuja demanda de água para hidratar e fluidificar a mistura foi maior. Portanto, as prévias de G2 tiveram maior fluidez. A adequação da reologia ao processamento do concreto no que diz respeito ao manuseio, aplicação e transporte é facilitada pela granulometria (G2), que possui maior quantidade de partículas finas (matriz) e teor de água na mistura. Porém, essa condição é acompanhada pelo aumento na porosidade resultante do excesso de água na mistura, comprometendo as características físicas do material (resistência mecânica).

Analisando a mesma granulometria, a adição de dispersante também melhorou os índices de fluidez. Isso se deve à redução de formação de aglomerados por meio da estabilização eletroestérica causada pelo dispersante. Dessa maneira, a água, que antes era aprisionada no interior dos aglomerados, pode contribuir mais efetivamente no auxílio à movimentação dos agregados na matriz. A mistura ficou mais estável e trabalhável por um período maior de tempo, melhorando a trabalhabilidade do concreto. Além das melhorias de processamento, a adição de dispersante otimizou o adensamento do concreto, e por isso afetou positivamente na redução da porosidade e ganho na resistência mecânica.

De maneira geral, as prévias de granulometria G1 (P2 a P4) apresentaram melhores propriedades de comportamentos físico e mecânico (porosidade, resistência e densidade), e as prévias G2 (P6 a P8), mostraram-se as de melhor manuseio e processamento. Para G1 e G2, a adição do dispersante melhorou a fluidez e resistência, e reduziu a porosidade.

## REFERÊNCIAS

**ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica.** Disponível em:< <http://www.abceram.org.br/site/index.php?area=4> >. Acesso em: 23 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13320:** materiais refratários - determinação da fluidez de concretos refratários convencionais e concretos de fluência livre Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8382:** materiais refratários não conformados - preparação de corpos-de-prova de concretos para projeção, concretos isolantes, concretos densos e concretos de fluência livre. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11222:** materiais refratários densos não-conformados - determinação das resistências à flexão e à compressão à temperatura. Rio de Janeiro, 2010.

**ASTM C373-14a:** standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products, ceramic tiles, and glass tiles, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

AMARAL, L. F. *et al.* Mecanismos de hidratação do óxido de magnésio. **Cerâmica [online]**. 2007, vol.53, n.328, pp.368-372. ISSN 0366-6913. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132007000400006>> Acesso em: 10 mai. 2016.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007. 334 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos materiais) - Universidade de São Paulo Interunidades (IFSC - IQSC - EESC), São Carlos, São Paulo. Disponível em: <[http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/.../Tese\\_AlessandraLCastro.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/.../Tese_AlessandraLCastro.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2016.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**. 2009, vol.55, n.333, p.18-32.

CHABAS, E. *et al.* Rheological and dispersion behaviour of calcined aluminas with deflocculants. **Refractories Worldforum**, [Gardanne, France], 2013, n 5, 2013, 4, p. 13–14. Disponível em: <<http://alteo-alumina.com/sites/default/files/Ressources/ALTEO%20-%20Rheological%20and%20Dispersion%20Behaviour%20of%20Calcined%20Aluminas%20with%20Deflocculants.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2016.

CINTRA, Danielli Cristina Borelli *et. al.* Estudo de procedimentos de adensamento do concreto por vibradores de imersão em obras na Grande Vitória – ES. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55, Outubro 2013, Vitória. Ibracon, 2013. p.1-14. **Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto**. Disponível em: <<https://lemacufes.files.wordpress.com/2012/03/estudo-de-procedimentos-de-adensamento-do-concreto-por-vibradores-de-imersc3a3o-em-obras-na-grande-vitc3b3ria-es.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2016.

COTTA, Luiza Santos; RODRIGUES, Christianne Garcia. Avaliação de Revestimento Refratário no Processo Siderúrgico. **Revista E-xacta**, Belo Horizonte: Editora UniBH , v. 7, n. 1, p.185-203, 2014. Disponível em: <<http://www.unibh.br/revistas/exacta>>. Acesso em: 10 mai. 2016.

FUCHS, Herson Carlos. **Estudo do tamanho de Grão em Amostras de Ferro Sinterizadas em Descarga Elétrica de Cátodo Oco**. 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <[http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao\\_094\\_herson\\_carlos\\_fuchs.pdf](http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_094_herson_carlos_fuchs.pdf)>. Acesso em: 10 set. 2015.

GEYER, André Luiz Bottolacci; SÁ, Rodrigo Resende de. Importância do Controle de Qualidade do Concreto no Estado Fresco. **Realmix**, Aparecida de Goiânia, 2006, Ano 2, n 2, jul. 2006, 8 p. Disponível em: <[http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2\\_informativo\\_internet.pdf](http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/Ano2_informativo_internet.pdf)>. Acesso em: 14 jan. 2016.

HAMER, Frank; HAMER, Janet. **The Potter's dictionary of materials and techniques**. 3ª ed. A & C Black Publishers, Limited, Inglaterra. 1991.

INNOCENTINI, M. D. M. *et al.* Efeito da distribuição granulométrica na secagem de concretos refratários. **Cerâmica [online]**. 2001, vol.47, n.304, pp.212-218. ISSN 0366-6913. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v47n304/7815.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

LINK, Marcelo; BRAGANÇA, Saulo Roca; BERGMANN, Carlos Pérez. Influência da Razão  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2 \text{O}$  do Silicato de Sódio na Defloculação de Suspensões Aquosas Empregadas na Conformação por Colagem de Barbotinas. **Cerâmica Industrial**, [Porto Alegre], 2013, v 18, n 1, Janeiro/Fevereiro, p. 25–28. Disponível em: <<http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v18n1/v18n1a04.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2015.

MHETA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

NAKAGAWA, Z. **Refractories Handbook: Testing of refractories**. Japão, 1998. 577p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**, 5ed. São Paulo: Bookman, 2016, 575 p.

OLIVEIRA, I.R.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos refratários na presença de diferentes tipos de aditivo e ligante hidráulico. **Cerâmica**. 2007, vol. 53, pp.263-269.

ORTEGA, F.S. *et al.* Defloculação e Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina Estabilizadas com dispersantes Poliacrílicos. **Cerâmica Industrial**, [São Carlos], 1997, n 2 (5/6) Setembro/Dezembro, p. 34–37. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v02n56/v2n56\\_5.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v02n56/v2n56_5.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2015.

PANZERA, Túlio Hallak. **Desenvolvimento de um Material Compósito Cerâmico para Aplicação em Mancais Porosos**. 2007, 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

PILEGGI, Rafael Giuliano; PANDOLFELLI, Victor Carlos; RODRIGUES, José de Anchieta. Concreto Refratário Auto-Escoante: Metodologia de Formulação e Correlações entre Distribuição Granulométrica e Reologia. **Cerâmica Industrial**, [São Carlos], 1996, v 1, n 3, Julho/Agosto, p. 7–12. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v01n03/v1n3\\_1.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v01n03/v1n3_1.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2015.

RAAD, Henrique Jardim. **Influência das Condições de Mistura e Moldagem na Permeabilidade de concretos refratários aluminosos**. 2008. 151 p., Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-7NHKUG/raad\\_\\_h.\\_j.\\_idcdmemnpdcra.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-7NHKUG/raad__h._j._idcdmemnpdcra.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 10 out. 2015.

RAMAL JR, F. T. *et. al.* A curva de distribuição granulométrica e sua influência na reologia de concretos refratários. **Cerâmica [online]**. 2002, vol.48, n.308, pp.212-216. ISSN 0366-6913. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132002000400008>> Acesso em: 05 fev. 2016.

SAKO, E. Y., PANDOLFELLI, V. C. Artigo revisão - A relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos refratários espinelizados de alto desempenho. **Cerâmica 60**. [São Carlos], Universidade Federal de São Carlos, 2014. p. 127-143. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/ce/v60n353/18.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2015.

SANTOS, Karine de Paula Bastos. **Mecanismos de degradação em concretos refratários – estudo de caso**. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2008. 56 p.

SANTOS, W. N. dos. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. **Cerâmica [online]**. 2002, vol.48, n.306, pp.86-91. ISSN 0366-6913. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v48n306/10684.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

SILVA, Angelus Giuseppe Pereira da; ALVES JUNIOR, Clodomiro. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. **Cerâmica [online]**. 1998, vol. 44, n. 290, pp.225-232. ISSN 0366-6913. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69131998000600004&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69131998000600004&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)> Acesso em: 10 mar. 2016.