

## **Caracterização de Cimentos Aluminosos obtidos através de diferentes rotas de produção.**

### **(Characterization of Alumina Cements obtained through different production methods)**

M.A. Sant'Anna<sup>1,2</sup>, P.M. Nakachima<sup>1</sup>, M.A. Reis<sup>1</sup>, R.V. Fernandes<sup>1</sup>, L.L.H.C. Ferreira<sup>1,3</sup>, A.L. Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mineração Curimbaba LTDA

Rodovia Poços de Caldas – Caldas km 10, Poços de Caldas – MG, 37701-970

<sup>2</sup> Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís 310, São Carlos –SP, 13565-905

<sup>3</sup>Elfusa Geral de Eletrofusão LTDA

Rua Júlio Michelazzo 501, Vila N. Senhora de Fátima, S. João da Boa Vista – SP, 13872-900  
[milli.santanna@curimbaba.com.br](mailto:milli.santanna@curimbaba.com.br)

#### **Resumo**

*Os cimentos de aluminato de cálcio foram desenvolvidos a partir da necessidade de se obter um ligante resistente à corrosão de íons sulfetos. Atualmente existem diversas aplicações desta classe de materiais, desde biomaterial até seu uso mais conhecido como ligante na produção de concretos refratários. O principal objetivo deste estudo é avaliar diferentes rotas de produção de CAC de alta pureza em comparação a produtos comerciais. As fases obtidas e seus teores variaram de acordo com os respectivos processos. As propriedades que sofreram a maior variação de acordo com o processo de produção foram a trabalhabilidade (10-280min) e tempo de pega inicial (10-510min). O processo de adição de uma alumina de transição a um cimento de menor pureza se mostrou eficiente para a produção de um ligante com elevada resistência mecânica (96,7MPa a 1400°C), refratariedade (superior a 1600°C) e tempo de pega (final 215min) compatíveis aos já estabelecidos no mercado.*

*Palavras-chave: Cimento Aluminoso, Sinterização, Fusão, Refratariedade, Trabalhabilidade*

#### **Abstract**

*Calcium aluminate cements were first developed as a binder due to its resistance against sulfide ions corrosion. Currently, there are several applications of this material, as a biomaterial or as a binder for the production of refractory castables. The main goal of this study is to evaluate different production routes of high purity CAC in comparison to commercial products. The mineralogical phases obtained and their contents changed according to their respective processes. The properties that showed large variations according to the production processes were workability (10-280min) and initial setting time (10-higher than 510min). The process of adding a transition alumina to a lower purity cement proved to be efficient for the production of a binder with mechanical strength (96.7MPa at 1400°C), refractoriness (superior to 1600°C), and setting time (final at 215min) compatible with commercial products.*

*Keywords: Alumina Cements, Sintering, Fusion, Refractoriness, Workability.*

## INTRODUÇÃO

Os cimentos de Aluminato de Cálcio (CAC), ou simplesmente cimentos aluminosos, foram respectivamente desenvolvidos e comercializados a partir do final do século XIX e início do século XX. Tal desenvolvimento surgiu da necessidade de se desenvolver um cimento que fosse resistente a sulfatos e à água do mar [1-3]. O desenvolvimento de cimentos resistentes a ambientes agressivos foi iniciado por Vicat, em meados de 1840, e por Ebelman, em 1848. Ambos trabalharam em misturas de matérias-primas que provocariam reação de alumina e cal após aquecimento [1,4]. Entretanto, a aplicação tecnológica teve destaque somente em 1908/09, quando Bied recebeu patentes na França e Inglaterra pelo método de produção de um CAC a partir de bauxita e cal, ficando este trabalho vastamente conhecido [1,4].

Se comparado aos cimentos Portland (cimentos de silicato de cálcio ou cimentos silicosos), os CACs têm diferentes composições químicas em que se destacam os elevados teores de óxido de alumínio em suas composições, culminando em diferentes propriedades em relação àqueles. Além da elevada resistência à corrosão por sulfatos, o cimento aluminoso tem inúmeras vantagens sobre o cimento Portland, como o menor tempo para desenvolvimento de resistência mecânica (efeito conhecido como cura), elevada resistência à abrasão e à reação álcali-sílica. Além disso, a produção de CAC resulta em menores emissões de CO<sub>2</sub> do que a produção de cimento Portland [5,6]. Em adição a todas estas vantagens já mencionadas, o desempenho a altas temperaturas encontra local de destaque, sendo evidenciadas composições com excelentes propriedades refratárias e uma vasta aplicação neste segmento [7, 8].

A fase majoritária presente em todos os CACs comerciais é a fase estequiométrica CA (C= CaO; A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), conhecida como monoaluminato de cálcio. Outras fases presentes são a Grossita ou CA<sub>2</sub>, e a Maienita ou C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>. Quando presente em pequenas quantidades, a sílica pode estar na forma de Gelenita ou C<sub>2</sub>AS (S = SiO<sub>2</sub>). Já o óxido de ferro, se presente em maiores quantidades, pode gerar a fase Brownmillerita ou C<sub>4</sub>AF (F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Para tais fases, temos que a fase CA, que usualmente compõe cerca de 70% do material, tem uma temperatura de decomposição relativamente alta (1600°C), e é responsável pelo desenvolvimento de alta resistência inicial. A fase CA<sub>2</sub> é a mais refratária dentre as obtidas tradicionalmente (decomposição a 1750°C), e requer maior tempo para sua hidratação. No entanto, sua hidratação é acelerada pela presença da fase CA. Já a fase C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> tem a característica de se hidratar mais rapidamente e sua concentração no cimento determinará a

velocidade da pega. Além disso, sua concentração também impactará a refratariedade, uma vez que possui uma temperatura de fusão relativamente baixa (1390°C).

Por fim, temos as fases C2AS e C4AF. Ambas não sofrem hidratação, e suas presenças teriam um maior impacto na cura do material, reduzindo a propriedade de pega hidráulica do cimento. Adicionalmente, ao avaliarmos os respectivos pontos de fusão (1590°C para C2AS e 1410°C para C4AF) percebemos que a presença da fase contendo ferro pode afetar consideravelmente a refratariedade do cimento [1,4, 6-7, 9-11].

Com base nestas informações, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos diferentes métodos de produção de cimentos aluminosos de alta pureza, caracterizando-os por meio de metodologias definidas para aplicação como matéria-prima refratária. Adicionalmente, o trabalho avalia o impacto da adição de alumina em um clínquer de pureza intermediária com a finalidade de aumentar sua pureza, alcançando composição mássica próxima a 70% de  $Al_2O_3$  e refratariedade simples superior a 1600°C.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Para este estudo, foram produzidas amostras de cimentos aluminosos por duas rotas diferentes a partir de clínqueres sinterizados, e uma comparação com duas amostras comerciais de cimentos aluminosos produzidos tanto pelo método de fusão quanto pelo método de sinterização.

A primeira rota consistiu em adicionar alumina a um clínquer aluminoso de pureza intermediária, controlando a composição e a granulometria desejada pela formulação das misturas e moagem em moinho de bolas. Nesta rota, foram utilizadas duas fontes diferentes de alumina, sendo a primeira oriunda de simples calcinação do hidróxido de alumínio advindo do processo Bayer (denominada aqui A1), e a segunda de dupla calcinação do mesmo material de partida (denominada A2). O clínquer selecionado é chamado aqui de CK 60, sendo produzido por uma mistura estequiométrica de bauxita e cal, convenientemente homogeneizada, granulada e processada em forno rotativo com temperaturas chegando a 1450°C, visando obtenção de grãos sinterizados de 60%  $Al_2O_3$ . As misturas estequiométricas, na quantidade total de 3 kg, foram finalmente processadas em moinho de bolas de laboratório (sistema fechado), com jarros metálicos de dimensões internas 190mm de diâmetro x 252 mm de altura, operando a uma frequência de 75 RPM durante 18 horas, utilizando elementos moedores de aço (50mm de diâmetro), visando a obtenção de um cimento bastante fino, controlado pela peneira ABNT malha 325.

A segunda rota, consistiu em já se produzir um clínquer com 70%  $Al_2O_3$ , efetuando posteriormente a moagem, nos mesmos moldes da primeira rota. Foram preparadas duas diferentes formulações de clínquer, denominadas ST 71A e ST 71B, variando-se unicamente as fontes de alumina. Para o ST 71A utilizou-se apenas alumina comercial enquanto para o ST71B utilizou-se uma mistura de alumina e bauxita com a finalidade de redução de custos e de avaliar o impacto da adição desta matéria prima nas propriedades do produto final. O processamento destes clínqueres foi similar ao do CK 60, e a denominação e composição de cada cimento, produzidos por ambas as rotas, estão resumidos na tabela I.

**Tabela I: Formulações utilizadas na produção dos cimentos aluminosos.**

CAC	Composição
CK 60 + A1	74% CK 60 + 26% A1
CK 60 + A2	75% CK 60 + 25% A2
ST 71A	35% Cal hidratada + 65% Alumina
ST 71B	32% Cal hidratada + 48% Alumina + 20% Bauxita

Os dois cimentos comerciais avaliados são aqui chamados de EL 70 e ST 70, sendo o primeiro produzido por fusão na empresa Elfusa Geral de Eletrofusão (Brasil), e o segundo, de fabricação francesa, produzido por método de sinterização.

A composição química foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (XRF-1800, Shimadzu), com amostras preparadas pelo método de fusão, em um equipamento automático de indução por alta frequência (HA-HF 16/2, Herzog). A análise mineralógica foi realizada por difratometria de raios X pelo método do pó (XRD-6000, Shimadzu), com radiação  $CuK\alpha$  (40kV, 30mA) em varredura contínua de  $2^\circ/\text{min}$ , no intervalo de 5 a  $70^\circ$  ( $2\theta$ ), e fendas fixas ( $1^\circ$ ;  $1^\circ$ ; 0,15mm).

Em relação à caracterização física do cimento, utilizou-se a norma NBR 9997 para determinar o teor de água na pasta pura (A/Cp) e o tempo de pega, por meio do equipamento de Vicat.[12] Os ensaios mecânicos de compressão foram moldados corpos de prova com 50mm de diâmetro, utilizando-se uma composição de concreto convencional, contendo 18% de cimento e 82% de agregado (óxido de alumínio eletrofundido marrom – ALOTAB ELFUSA), após 24 horas de cura fria ( $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ; umidade  $>80\%$ ), secagem ( $100^\circ\text{C}/36\text{h}$ ) e tratamentos térmicos (isotermas: 815 e  $1400^\circ\text{C}/6\text{h}$ ). Adicionalmente, partindo-se da mesma formulação de concreto foi também avaliada a trabalhabilidade [13]. Para análise granulométrica, seguiu-se a determinação por peneiramento via mista conforme NBR 6946 [14], enquanto a superfície específica foi determinada pelo método de Blaine da

permeabilidade do ar, conforme NBR 16372 [15]. Por fim, a refratariedade foi determinada utilizando o método de cone pirométrico equivalente (PCE) [16].

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A **Tabela II** apresenta a caracterização química dos cimentos e precursores estudados.

**Tabela II: Análise química dos precursores e de cimentos comerciais.**

Produtos	PPC*	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O+ Na <sub>2</sub> O
<b>CK 60</b>	0,25	59,90	30,40	4,12	3,94	0,37	0,80	0,11
<b>A1</b>	1,63	99,00	0,05	0,21	0,05	0,02	0,04	0,39
<b>A2</b>	0,11	99,20	0,07	0,09	0,04	0,03	0,03	0,29
<b>CK 60 + A1</b>	1,17	69,40	22,50	3,41	3,42	0,32	0,50	0,15
<b>CK 60 + A2</b>	0,25	69,50	22,90	3,08	3,36	0,33	0,52	0,10
<b>ST 71 A</b>	-	67,50	30,30	0,92	0,18	0,09	0,50	0,23
<b>ST 71 B</b>	-	68,70	28,10	1,34	0,75	0,12	0,47	0,21
<b>EL 70</b>	3,68	68,30	27,2	2,57	0,52	0,37	0,70	0,13
<b>ST 70</b>	0,27	69,60	29,50	0,15	0,09	0,07	0,21	0,16

\*PPC = Perda mássica por calcinação a 1100°C/2h.

A partir dos dados demonstrados na tabela II, é possível perceber que a adição de alumina em um clínquer de pureza intermediária (CK 60) gerou valores de óxido de alumínio compatível com os valores dos produtos comerciais (EL 70 e ST 70). As principais diferenças estão nos teores de CaO, SiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os teores de SiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mais elevados (~3-4%), estão relacionados à fonte de alumina (bauxita) utilizada no CK 60. A principal preocupação com esse maior teor de SiO<sub>2</sub> seria quanto à formação da fase Gelenita (C2AS), em que uma pequena quantidade de sílica adicional pode aumentar significativamente o teor desta fase [17]. Como esta fase não sofre processo de hidratação, sua presença retardaria o tempo de pega. Quanto ao menor teor de CaO (resultado similar para CK60+A1 e CK60+A2, com cerca de 22,5%), quando comparado aos produtos comerciais (cerca de 28%), deve-se avaliar o seu efeito principalmente no tempo de pega e trabalhabilidade de concretos formulados com os mesmos.

Para um maior entendimento das propriedades obtidas nos ensaios físicos, são apresentadas na **Tabela II** as fases mineralógicas das composições preparadas.

**Tabela III: Análise Mineralógica dos materiais em estudo.**

Produtos	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
<b>CK 60</b>	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Aluminato de Cálcio	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>7</sub> ) - Gelenita	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> - Grossita		
<b>A1</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - δ - Alumina				
<b>A2</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Coríndon	NaAl <sub>11</sub> O <sub>17</sub> - β - Alumina (traços)			
<b>CK60+ A1</b>	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Aluminato de Cálcio	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>7</sub> ) - Gelenita	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> - Grossita		
<b>CK 60+A2</b>	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Aluminato de Cálcio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Coríndon	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>7</sub> ) - Gelenita	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> - Grossita	
<b>ST 71 A</b>	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Aluminato de Cálcio	Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> - Maienita	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> - Grossita	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>7</sub> ) - Gelenita	
<b>ST 71 B</b>	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Aluminato de Cálcio	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> - Grossita	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>7</sub> ) - Gelenita	Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> - Maienita	
<b>EL70</b>	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Aluminato de Cálcio	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> - Grossita	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>7</sub> ) - Gelenita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Coríndon	Al(OH) <sub>3</sub> - Gibbsita
<b>ST70</b>	CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - Aluminato de Cálcio	CaAl <sub>4</sub> O <sub>7</sub> - Grossita	Ca <sub>12</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>33</sub> - Maienita		

É possível observar que, a fase majoritária para todos os cimentos é o aluminato de cálcio (CA). Este resultado é importante pois essa é a principal fase de pega hidráulica e responsável pela alta resistência após 24 horas. A fase secundária é a Grossita (CA2), também obtida em todas as formulações de cimento testadas e é a fase de maior refratariedade presente. Além disso, foi possível identificar a presença de maienita apenas no cimento ST 70 e nos cimentos produzidos chamados de ST 71A e ST 71B. Conforme característica da fase é possível prever que sua presença cause um impacto de redução no tempo de pega e na trabalhabilidade do material [4].

Comparando-se apenas os cimentos produzidos pelo método de adição de alumina, é possível identificar a presença da Gelenita em todas as amostras, apresentando coerência com os teores de sílica informados na tabela II. É possível identificar a presença de alumina também no cimento EL 70. Por fim, vale destacar a ausência de alumina delta na amostra CK 60+A1. Este fato relaciona-se à baixa cristalinidade da alumina de transição, impedindo uma contagem significativa dos raios X refletidos pelo principal plano cristalino desta fase, ainda que adicionada em quantidades apreciáveis (26%). Assim, como na mistura há a presença de várias fases cristalinas, a quantidade de alumina delta fica abaixo do limite de detecção da técnica, confundindo-se com a radiação de fundo.

A **Tabela III** apresenta as características físicas dos cimentos e as propriedades de suas pastas.

**Tabela III: Análises físicas dos cimento aluminosos.**

Cimentos	Teor de água pasta pura (%)	Granulometria #325 (% retido)	Sup. específica (cm <sup>2</sup> /g)	TPi* (min)	TPm* (min)	TPf* (min)	Refratariedade (°C) (nº cone orton)
<b>CK 60</b>	7,53	7,97	5092	360	490	>510	1455 (cones 16-17)
<b>CK 60 + A1</b>	7,33	10,31	9480	60	150	215	Superior a 1605 (cones 23-26)
<b>CK 60 +A2</b>	7,60	12,54	4294	>510	>510	>510	Superior a 1605 (cones 23-26)
<b>ST 71A</b>	7,30	0,08	7592	15	25	60	-
<b>ST 71B</b>	7,30	0,86	9916	10	20	80	-
<b>EL 70</b>	7,53	1,15	7590	245	410	>510	Superior a 1605** (cones 23-26)
<b>ST 70</b>	6,86	11,40	4617	270	440	>510	1590-1620 ** (cones 21-23)

\*TPi= *Tempo de pega inicial*; TPm=*Tempo de pega médio*; TPf= *Tempo de pega final*.

\*\* *Informações retiradas de catálogo de fornecedores.*

A análise granulométrica e a superfície específica estão relacionadas, pois ambas trazem informação sobre o tamanho das partículas. Em geral, quanto menor o tamanho de partículas maior será sua superfície específica e, portanto, maior sua reatividade ao entrar em contato com a água. Para a maioria dos casos, este conceito é observado na tabela IV. Esta afirmação fica bem evidente ao observarmos ambos resultados de ST 70 e EL 70. A exceção está na amostra CK 60 + A1. Este fato está relacionado à alumina adicionada que, por ser semicristalina, apresenta uma maior clivagem, elevando consideravelmente a sua superfície específica, não por conta de tamanho de partícula, mas por conta de sua morfologia. Dessa forma, explica-se essa não correlação, pois a técnica de Blaine considera que todas as partículas são esféricas e de tamanhos similares [18-19].

Ao observar os valores de tempo de pega é possível observar inicialmente que a presença de maenita teve grande influência para as amostras ST 71A e B pois os valores estão bem abaixo do esperado que seria cerca de 120 minutos para TPm de acordo com padrões estabelecidos pela Elfusa. Já para os materiais com adição de alumina, é possível perceber que os diferentes aditivos geraram resultados opostos. Para a alumina A2, por já estar majoritariamente em sua forma termodinâmica mais estável o seu efeito foi o de retardar o tempo de pega. Enquanto que a A1 teve o efeito de acelerar o tempo de pega do CK60+A1 que atingiu valores comparáveis a um cimento aluminoso especial.

Ao avaliarmos a refratariedade, é possível observar que a adição de alumina ao cimento de menor pureza no final do processo elevou consideravelmente a resistência à deformação em alta temperatura em cerca de 150°C, atingindo valores comparáveis aos produtos comerciais da classe. As amostras ET 71A e ET 71B não foram avaliadas.

A **Tabela IV** apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos após 24 horas de cura, após cura + secagem a 110°C/36h e após cura + secagem + tratamento térmico dos corpos de prova a 815 e 1400°C (isoterma de 4h). Adicionalmente, foi avaliada a trabalhabilidade que é o tempo em que o concreto é passível de moldagem.

**Tabela IV: Propriedades do concreto refratário.**

Produtos	Teor de água no concreto	Trabalhabilidade (min)	RC-24h (MPa)	RC-110°C (MPa)	RC-815°C (MPa)	RC-1400°C (MPa)
<b>CK 60</b>	0,31	265	29,01	58,76	31,68	28,69
<b>CK 60 + A1</b>	0,28	115	28,43	53,85	60,60	96,74
<b>CK 60 + A2</b>	0,28	180	33,73	50,10	34,23	54,48
<b>ST 71A</b>	0,29	10	57,66	49,70	47,80	37,40
<b>ST 71B</b>	0,28	15	56,68	64,70	53,70	58,00
<b>EL 70</b>	0,32	280	40,10	76,05	68,84	88,71
<b>ST 70</b>	0,27	145	43,01	75,21	77,47	81,79

É possível observar que a trabalhabilidade é a propriedade com maior variação entre as amostras. Assim como no tempo de pega, a presença de maianita nas amostras ST 71A e B influenciou na trabalhabilidade, reduzindo-a de forma considerável. O ST 70 provavelmente sofreu o mesmo efeito, a diferença na intensidade está no teor de maianita encontrado nesse cimento. Já a adição de alumina no CK 60 teve um efeito diferente do esperado. Por se tratar de uma fase sem pega hidráulica, acredita-se que a alumina retardaria a trabalhabilidade do cimento. O resultado obtido, no entanto, foi uma redução nesse tempo que ficou ainda mais evidente na adição de A1. Acredita-se que pode ter ocorrido em ambos os casos uma interação com os agregados que eram de alumina, sendo que essa interação foi maior para a A1, devido ao fato de ser uma alumina com alta superfície específica e, portanto, mais reativa. Existem estudos apontando para a alta reatividade desta alumina devido a sua área específica e porosidade, entretanto maiores observações e testes devem ser realizados para entendimento e reprodução deste mecanismo em específico, não sendo ainda encontrado uma referência segura na literatura [19,20,21].

Por fim, pode-se observar os resultados para resistência a compressão dos materiais. Após a cura a 24 horas em uma câmara de umidade controlada, houve uma variação de resultados. Os cimentos ST 71A e B obtiveram os maiores valores chegando a quase 58 MPa,



o que deve estar relacionado a um maior desenvolvimento inicial de resistência mecânica desses materiais. Os cimentos gerados a partir do CK 60 foram os que obtiveram os menores resultados após 24 horas, com cerca de 30 MPa. A tendência seguida para a maioria dos materiais avaliados foi de um aumento após a secagem, uma ligeira queda a 815°C e um novo aumento a 1400°C. A queda da resistência mecânica a 815 °C está relacionada a uma série de reações de perda de água ligada quimicamente aos hidratos que acontece durante o aquecimento inicial de estruturas cerâmicas moldadas com ligantes hidráulicos [22].

Vale destacar que o material com maior resistência após queima a 1400°C (temperatura próxima à de trabalho) foi o CK 60 + A1. Acredita-se que esse valor elevado pode estar relacionado a questões macro e microestruturais, seja por possíveis transformações de ordem cristalina (mudanças de fase ou crescimento de grão), ou uma maior interação entre os agregados e o ligante, reduzindo a porosidade do sistema.

## CONCLUSÕES

A produção de um cimento de alta pureza utilizando uma rota alternativa de adição de alumina ao final do processo mostrou-se viável para a classe 70%  $Al_2O_3$ , em que a refratariedade acima de 1600°C foi garantida. O cimento CK 60 + A1, produzido por clínquer sinterizado 60%  $Al_2O_3$  + alumina delta, proporcionou um concreto com boa trabalhabilidade (115 min) e a maior resistência mecânica (RC-1400°C = 96,7 MPa).

A fase maienita nos cimentos ST 71 inviabilizou sua aplicação prática devido aos reduzidos tempos de pega inicial e baixa trabalhabilidade (ambos abaixo de 20 minutos). Porém, observou-se que a substituição de um teor de bauxita por alumina para reduzir os custos de matéria-prima não gerou nenhum efeito deletério nas propriedades finais avaliadas.

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à estrutura e materiais fornecidos pelo Grupo Curimbaba, através das empresas Mineração Curimbaba e Elfusa Geral de Eletrofusão, às quais manifestamos agradecimento junto à toda equipe de colaboradores. Fazemos menção também à importante contribuição do prof. Dr. Márcio Morelli e MSc. Walter Mariano – DEMa/UFSCar, responsáveis por viabilizar os ensaios de Refratariedade Simples.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. Gosselin, École polytechnique fédérale de Lausanne, (2009)- Tese (Doutorado)
- [2] M. R. Bosse, M. de Pieri, R. Coelli, C. A. da Luz, XIV ENTAC - Encontro Nac. Tecnol. do Ambient. Construído (2012) 4026-4031.
- [3] K. L. Scrivener, J. L. Cabiron, R. Letourneux, Cem. Concr. Res. 29 (1999) 1215–1223.
- [4] J. E. Kopanda, G. MacZura Production processes, properties, and application for calcium aluminate cements. In: Hart LD. Alumina Chemicals. Westerville Science and Technology Handbook; (1990). p. 171-184.
- [5] R. Stonys, R. Boris, V. Antonovic, Construction and Building Materials Journal, 205 (2019) 387-397
- [6] M. C. G. Juenger, F. Winnefeld, J. L. Provis, J. H. Ideker, Cem. Concr. Res. 41, (2011) 1232–1243.
- [7] H. Pöllmann, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 74 (2012) pp. 1-82.
- [8] E. B. Nelson, Well Cementing, Schlumberger Educational Services, Sugar Land (1990) p. 485.
- [9] J.R. Garcia, I.R. Oliveira, V. C. Pandolfelli, Cerâmica 53, (2007) 42–56.
- [10] R. R. Lourenço, R. S. Angélica, J. de A. Rodrigues, Mater. Res. 16 (2013) 731-739.
- [11] K. L. Scrivener, A. Capmas, Calcium Aluminate Cements. in Lea's Chemistry of Cement and Concrete 713–782 (Butterworth-Heinemann, 1998).
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) Cimento Aluminoso – Determinação da Consistência Normal e dos Tempos de Pega - NBR 9997:2015. Rio de Janeiro, ABNT
- [13] Ensaio com Concretos – Norma Elfusa (2008) IT - 4111-019 v.04/2016. SGQ - Elfusa, Grupo Curimbaba.
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) Materiais Refratários – Determinação granulométrica por peneiramento de matérias-primas refratárias e materiais refratários não conformados - NRB 6946:2015. Rio de Janeiro, ABNT.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine) - NRB 16372:2015. Rio de Janeiro, ABNT
- [16] ASTM C24 Standard Test Method for Pyrometric Cone Equivalent (PCE) of Fireclay and High Alumina Refractory Materials, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.
- [17] T. D. Robson, High-Alumina Cements and Concretos, John Willey & Sons, Inc., New York – NY (1962).
- [18] E. C. Arvaniti, M. C. G. Juenger, S. A. Bernal, J. Duchesne, L. Courard, S. Leroy, J. L. Provis, A.Klemm, N. De Belie, Materials and Structures 48 (2015) 3687–3701.
- [19] P.K. Kiyohara, H. S. Santos, A. C. V. Coelho, P. De S. Santos, An. Acad. Bras. Ciênc. 72 (2000) 471-495
- [20] D. Laurenti, B. Phung-Ngoc, C. Roukoss, E. Devers, K. Marchand, L. Massin, L. Lemaitre, C. Legens, A. Quoineaud, M. Vrinat, Journal of Catalysis 297 (2013) 165–175
- [21] K. N. P. Marcos, Escola Politécnica do Estado de São Paulo, (2008) - Tese (Doutorado)
- [22] J. S.Uehara, R.Salomão, Anais do 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Águas de Lindóia, S.P.,v.1, p. 973-984