

## Agentes ligantes para concretos refratários: uma breve revisão da literatura

**RAFAEL SALOMÃO** - PROF. TITULAR - <https://orcid.org/0000-0003-3392-6857> - ([rsalomao@sc.usp.br](mailto:rsalomao@sc.usp.br));

**ANA CAROLINA FIGUEIREDO PRADO** - DOUTORA - <https://orcid.org/0000-0001-9421-8868> ;

**CRISLAYNE GABRIELA ANDRETO** - DOUTORA - <https://orcid.org/0000-0001-8098-5353> ;

**LEANDRO FERNANDES** - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0003-0384-3604> – EESC/USP

**ULISSES S. PRADO** - DOUTOR - <https://orcid.org/0000-0003-4794-3957> - ([ulissesprado@uol.com.br](mailto:ulissesprado@uol.com.br)) – Lining Representação, Consultoria e Projetos Ltda

### RESUMO

**C**ONCRETOS REFRAATÓRIOS SÃO MATERIAIS CERÂMICOS MOLDÁVEIS, PROJETADOS PARA APLICAÇÕES EM ALTAS TEMPERATURAS, NOS QUAIS OS AGENTES LIGANTES DESEMPENHAM UM PAPEL FUNDAMENTAL NO PROCESSAMENTO E NO DESEMPENHO EM SERVIÇO. ESTE ARTIGO REALIZOU UMA REVISÃO DA LITERATURA SOBRE OS DOIS PRINCIPAIS SISTEMAS DE LIGANTES EMPREGADOS NESSE TIPO DE CONCRETO: CIMENTOS DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC) E SÍLICA COLOIDAL (SC). INICIALMENTE, SÃO APRESENTADAS AS DIFERENÇAS EM RELAÇÃO AOS CONCRETOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL E A IMPORTÂNCIA DAS MATÉRIAS-PRIMAS REFRAATÓRIAS. EM SEGUIDA, SÃO DISCUTIDAS AS MÚLTIPLAS FUNÇÕES DOS LIGANTES AO LONGO DAS ETAPAS DE MISTURA, CURA, SECAGEM, SINTERIZAÇÃO E

OPERAÇÃO. O CAC ATUA POR MEIO DA HIDRATAÇÃO, PROPORCIONANDO RESISTÊNCIA INICIAL RÁPIDA, EMBOIRA POSSA GERAR FASES DE MENOR REFRAATARIEDADE. DIFERENTEMENTE, A SC GELIFICA, RESULTANDO EM MICROESTRUTURAS MAIS HOMOGÊNEAS E MAIOR ESTABILIDADE TERMOQUÍMICA. SÃO DISCUTIDAS AS IMPLICAÇÕES DESSES MECANISMOS NAS ETAPAS DE PROCESSAMENTO E DE APLICAÇÃO, EVIDENCIANDO AS VANTAGENS E LIMITAÇÕES DE CADA SISTEMA E CONTRIBUINDO PARA A SELEÇÃO ADEQUADA CONFORME AS EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO.

**PALAVRAS-CHAVE:** CONCRETOS REFRAATÓRIOS, LIGANTES REFRAATÓRIOS, EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL, CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO, SÍLICA COLOIDAL.

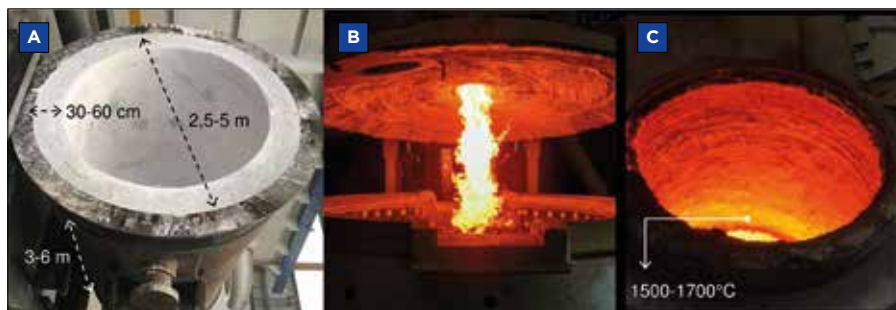
### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 Objetivos e metodologia de revisão

Este estudo realizou uma revisão da literatura sobre os dois principais sistemas de ligantes empregados em concretos refratários: o cimento de aluminato de cálcio (CAC) e a sílica coloidal (SC). Inicialmente, são apresentadas as diferenças em relação aos concretos de construção civil e a importância das matérias-primas refratárias. Em seguida, são discutidos individualmente os mecanismos de consolidação, as particularidades de processamento e as múltiplas funções dos ligantes ao longo das etapas de mistura, cura, secagem, sinterização e operação. Por fim, um quadro comparativo apresenta as principais vantagens e limitações de cada sistema. Além de livros técnicos, foram consultadas publicações indexadas e identificadas nos bancos de dados *Web of Science (Clarivate)* e *Scopus (Elsevier)*, entre 1980 e 2026, tendo como palavras-chave os termos “*refractory castables*”, “*binders*”, “*calcium aluminate cement*” e “*colloidal silica*”. Adicionalmente, informações sobre as classificações e nomenclaturas desses sistemas foram levantadas junto ao portal eletrônico da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Todas as pesquisas foram conduzidas entre 1 e 15 de maio de 2026.

#### 1.2 Aspectos gerais dos concretos refratários

Os concretos refratários (também conhecidos como refratários monolíticos ou



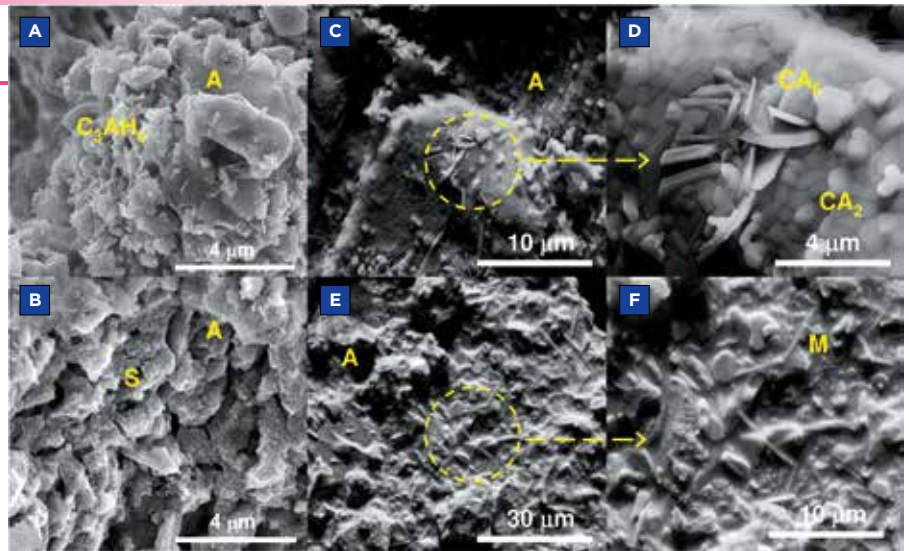
### FIGURA 1

EXEMPLO DE EQUIPAMENTO SIDERÚRGICO (PANELA DE ACIARIA) REVESTIDO COM CONCRETO REFRAATÓRIO À BASE DE ÓXIDOS DE ALUMÍNIO E MAGNÉSIO, LIGADO COM CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC): A) EQUIPAMENTO COM REVESTIMENTO EM CONCRETO RECÊM-DESMOLDADO, B) ETAPA DE SECAGEM E AQUECIMENTO INICIAL COM USO DE MAÇARICOS, C) EQUIPAMENTO AQUECIDO E SINTERIZADO, PRESTES A RECEBER AÇO LÍQUIDO (COM TEMPERATURAS ENTRE 1500 E 1700 °C)

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

não conformados são uma classe de materiais cerâmicos moldáveis, desenvolvidos para operar sob condições extremas de temperatura, abrasão e ataque químico, sendo amplamente empregados em equipamentos industriais, como fornos, caldeiras e reatores, nas indústrias siderúrgicas, petroquímicas, cimentícias, de fundição, entre outras (Figura 1) (1-3). Diferentemente dos concretos utilizados na construção civil, cujo principal objetivo é garantir resistência mecânica estrutural em condições ambientais moderadas, os concretos refratários são projetados para manter estabilidade físico-química e integridade microestrutural em temperaturas elevadas, frequentemente superiores a 1000 °C (4).

Nos concretos de construção civil, as formulações típicas contêm agregados grossos e finos (brita de rocha vulcânica, como quartzo, basalto e granito e calcário) e uma matriz ligante baseada em água (10-20% em massa), areia e cimento Portland, cuja hidratação resulta na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pelo ganho de resistência mecânica durante a cura (5). Entretanto, essas fases são termicamente instáveis e sofrem decomposição progressiva a temperaturas relativamente baixas (acima de 250 °C), o que pode aumentar a porosidade e comprometer a integridade do material. Em contraste, os concretos refratários utilizam matérias-primas com alto ponto de fusão e sistemas de ligantes específicos que conferem maior resistência térmica e estabilidade em serviço (5-8). Os agregados refratários têm granulometria entre 10 mm e 100 µm e são compostos por sílica fundida ( $\text{SiO}_2$ ,  $T_{\text{Fusão}} = 1800$  °C), mulita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ,  $T_{\text{Fusão}} = 1900$  °C), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $T_{\text{Fusão}} = 2000$  °C), ou magnésia ( $\text{MgO}$ ,  $T_{\text{Fusão}} = 2800$  °C). Sua distribuição granulométrica é cuidadosamente projetada para maximizar o empacotamento das partículas, reduzir a porosidade inicial e otimizar as propriedades reológicas no estado fresco. Essa abordagem permite a obtenção de sistemas com elevada densidade após a secagem e sinterização, contribuindo para o desempenho mecânico e a resistência à corrosão por escórias (3,9). Já, a matriz é elaborada com baixo teor de água (entre 4 e 7 % em massa) e frações finas e reativas (100-0,1 µm) de partículas à base de alumina



**FIGURA 2**

MICROESTRUTURAS TÍPICAS DE MATRIZES DE CONCRETO REFRAATÓRIO LIGADAS COM CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (A) APÓS SECAGEM A 120 °C E (C-D) APÓS SINTERIZAÇÃO A 1500 °C OU COM SÍLICA COLOIDAL ANIÔNICA (B) APÓS SECAGEM A 120 °C E (E-F) APÓS SINTERIZAÇÃO A 1500 °C.

ABREVIACOES:  $\text{C}_3\text{AH}_6 = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{S} = \text{SiO}_2$ ;  $\text{CA}_2 = \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{CA}_6 = \text{CaO}_6 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{M} = 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$

FONTE: REFERÊNCIAS (8, 10)

calcinada ou sílica ativa, aditivos dispersantes e agentes ligantes, como cimentos de aluminato de cálcio (CAC, Figura 2a), ligantes coloidais (sílica ou alumina coloidal, Figura 2b) ou ligações químicas alternativas (por exemplo, ligações fosfáticas) (5).

Em relação às denominações dos concretos refratários, eles podem ser classificados em diferentes categorias, como densos (de função estrutural) ou porosos (para isolamento térmico, sem função estrutural, com densidade aparente entre 0,7-1,2 g/cm<sup>3</sup>), convencionais, de baixo teor de cimento (BTC, 1,0-2,5 %), ultrabaixo teor de cimento (UBTC, 0,2-1,0 %) e livres de cimento (NC, CaO < 0,2 %), sendo esta classificação baseada na quantidade e no tipo de ligante empregado (2-4).

Em seu estado fresco, os concretos refratários podem ser transportados por bombeamento (concretos bombeáveis) e aplicados por diversos processos, como moldagem direta (autoescoantes), com auxílio de vibração (vibrados) ou ainda por projeção. Após a moldagem, o processo de cura geralmente leva de 12 a 24 h e ocorre à temperatura ambiente. Em seguida, nas etapas de secagem e de aquecimento inicial, ocorre a eliminação de água livre e combinada, seguida da formação de ligações cerâmicas por sinterização. Dependendo da composição, podem ocorrer

transformações de fase, como a conversão de aluminatos hidratados em fases anidras estáveis (Figuras 2c-d) ou a formação de mulita em sistemas alumina-sílica (Figuras 2e-f) (8). Essas transformações são críticas para o desenvolvimento das propriedades finais, incluindo a resistência mecânica a quente, a estabilidade dimensional e a resistência ao choque térmico.

## 2. AS (MUITAS) FUNÇÕES DOS AGENTES LIGANTES EM CONCRETOS REFRAATÓRIOS

Nos concretos refratários, os ligantes desempenham um papel central não apenas na consolidação inicial, mas também na evolução microestrutural e no desenvolvimento das propriedades ao longo do processamento térmico e do uso em serviço. Sua atuação deve ser analisada de forma integrada, considerando as etapas de mistura, moldagem, cura, secagem, sinterização, operação em alta temperatura, demolição e reciclagem.

Durante a mistura e a moldagem, os ligantes afetam diretamente o comportamento reológico da suspensão ou da massa. Em sistemas contendo CAC ou sílica coloidal, partículas finas interagem com a água e com dispersantes, controlando a viscosidade, a dispersão e a estabilidade (3,7,11). Ligantes coloidais, por exemplo,

formam redes tridimensionais a partir de partículas nanométricas, promovendo coesão inicial mesmo com baixos teores de água (9,11). Como esses concretos são frequentemente preparados no local de aplicação, pode-se empregar aditivos retardadores ou aceleradores para ajustar a trabalhabilidade às condições ambientais (12).

Na etapa de cura, os ligantes promovem o desenvolvimento da resistência mecânica inicial, denominada resistência verde (Figura 1a), essencial para a manutenção da geometria após a moldagem e para a desmoldagem rápida. A ausência de ação adequada do ligante pode resultar em segregação, trincas, empenamentos ou colapso estrutural (13). Após cerca de 24 horas, são atingidos níveis mínimos de resistência à compressão uniaxial (5-10 MPa) e à flexão (1-10 MPa), permitindo o manuseio sem danos (3,7,8).

Durante a secagem (25-150 °C, Figura 1b), o tipo de ligante influencia a permeabilidade e a distribuição de poros da microestrutura a verde. Estruturas mais densas podem dificultar a remoção de água (8, 10, 13), exigindo taxas de aquecimento lentas (inferiores a 1 °C/h) ao longo de vários dias. Para reduzir o risco de explosões por vapor, utilizam-se aditivos de secagem, como fibras

poliméricas, que aumentam a permeabilidade inicial de forma controlada (4).

Após essa etapa, o aquecimento até as temperaturas de sinterização (1000-1600 °C, Figura 1c) promove a transformação dos ligantes em ligações cerâmicas estáveis. Dependendo da composição, o ligante pode favorecer a densificação, o ganho de resistência mecânica a quente e a estabilidade dimensional, ou, de forma indesejada, gerar fases de baixo ponto de fusão, como anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ,  $T_{\text{Fusão}} = 1550 \text{ °C}$ ) e gehlenita ( $\text{Ca}_2\text{A}_2\text{SiO}_7$ ,  $T_{\text{Fusão}} = 1590 \text{ °C}$ ) (8).

Em fase de serviço, que pode durar de semanas a anos, dependendo da aplicação, o desempenho do concreto é governado pelas ligações cerâmicas formadas. A escolha do ligante define a quantidade de fases de baixo ponto de fusão, a refratariedade e a resistência à corrosão química (8, 14). Microestruturas com menor fração de fase líquida tendem a apresentar melhor desempenho em ambientes agressivos, maior resistência ao choque térmico e menor deformação sob carga.

Ao final da vida útil, na demolição e reciclagem, o tipo de ligante também é determinante. Sistemas com maior teor de fases ricas em cálcio, fases vítreas ou ligações menos refratárias tendem a fratu-

rar de forma mais frágil, o que pode limitar a qualidade do material reciclado (3). Em contraste, concretos com baixo teor de ligante ou baseados em ligações coloidais podem apresentar maior resistência à fragmentação, o que dificulta a remoção, mas favorece a obtenção de agregados de melhor qualidade para reaproveitamento.

### 3. SISTEMAS LIGANTES MAIS UTILIZADOS EM CONCRETOS REFRAATÓRIOS

#### 3.1 Cimento de aluminato de cálcio (CAC)

Os concretos refratários ligados com cimento de aluminato de cálcio (CAC) constituem uma das tecnologias mais consolidadas entre os materiais refratários moldáveis, sendo amplamente utilizados devido à sua versatilidade de processamento e ao bom desempenho em diferentes aplicações industriais (3,7,8). Seu desenvolvimento remonta ao início do século XX, quando esses cimentos foram produzidos na França, por volta de 1908, visando maior tolerância a ambientes quimicamente agressivos e ganho acelerado de resistência em comparação com o cimento Portland. Seu uso em refratários se intensificou a partir da segunda metade do século XX, acompanhando a expansão das indústrias siderúrgicas e de cimento, que exigiam materiais capazes de suportar altas temperaturas e ciclos térmicos severos (4,5).

No processamento, sistemas com CAC caracterizam-se por apresentarem reações de hidroxilação após a adição de água. As fases anidras, principalmente CA ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) e  $\text{CA}_2$  ( $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ ), reagem formando compostos hidratados como  $\text{CAH}_{10}$  ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) e  $\text{C}_2\text{AH}_8$  ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), que podem se converter em  $\text{C}_3\text{AH}_6$  ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), com formação simultânea de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (7,8). Esses produtos, com morfologia lamelar e acicular (Figura 2a), preenchem os vazios e enrijecem a estrutura após a moldagem.

A temperatura de cura influencia a cinética de hidratação e as fases formadas (13). Abaixo de 20-25 °C, predominam fases metaestáveis como  $\text{CAH}_{10}$  e  $\text{C}_2\text{AH}_8$ , menos densas. Em temperaturas mais elevadas, favorece-se a formação de  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , que é mais estável e densa. Esse processo pode

**TABELA 1**

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS, VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC) E SÍLICA COLOIDAL (SC) COMO AGENTES LIGANTES EM FORMULAÇÕES DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS

Sistema ligante	Características gerais	Vantagens	Limitações
CAC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Composto por fases do sistema <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>-CaO</li> <li>Misturado a seco com outras matérias-primas do concreto</li> <li>Consolidação por formação de hidratos de aluminato de cálcio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Versatilidade (compatível com a maioria dos sistemas refratários: <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math>, MgO, SiC, carbono)</li> <li>Disponibilidade</li> <li>Menor custo (em comparação com SC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensibilidade à cura em <math>T &lt; 20 \text{ °C}</math> (baixa resistência à compressão; secagem requer atenção para evitar explosões)</li> <li>Pode reduzir refratariedade devido ao excesso de CaO na composição</li> </ul>
SC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Composta por nanopartículas de <math>\text{SiO}_2</math> vítreo e água</li> <li>Fornecida como dispersão coloidal aquosa e empregada como fase líquida do concreto</li> <li>Consolidação pela gelificação com óxidos alcalinos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facilidade de mistura, cura e secagem</li> <li>Microestrutura homogênea</li> <li>Atinge máximo de resistência à compressão em menor temperatura de sinterização</li> <li>Elevadíssima resistência à erosão e desgaste por abrasão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menor fluidez livre (em relação ao CAC)</li> <li>Menor resistência à compressão após desmoldagem (em relação ao CAC)</li> <li>Requer condições especiais para uso em sistemas com MgO e CaO</li> </ul>

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA

umentar a porosidade e reduzir a resistência mecânica a frio se não for controlado. No caso dos sistemas com teores de CAC baixos (1,0-2,5 %) e ultrabaixos (0,2-1,0 %), a reduzida resistência mecânica no estado fresco pode ser compensada pela adição de microsilica (ou sílica fume). Devido ao seu reduzido diâmetro médio de partícula (entre 0,05 e 0,1  $\mu\text{m}$ ), forma esférica e elevada área superficial específica (acima de 20  $\text{m}^2/\text{g}$ ), adições de 1-5 % dessa matéria-prima podem aumentar a resistência à compressão entre 25 e 50% graças ao melhor empacotamento e à reação pozolânica com o CAC (3,7,9). Durante a secagem, a remoção da água livre e combinada deve ser realizada cuidadosamente para evitar pressões internas de vapor. Com o aumento da temperatura, os hidratos se decompõem, formando fases anidras como CA,  $\text{CA}_2$  e  $\text{CA}_6$  (Figura 2c-d) (8), marcando a transição para ligações cerâmicas e o desenvolvimento das propriedades a quente.

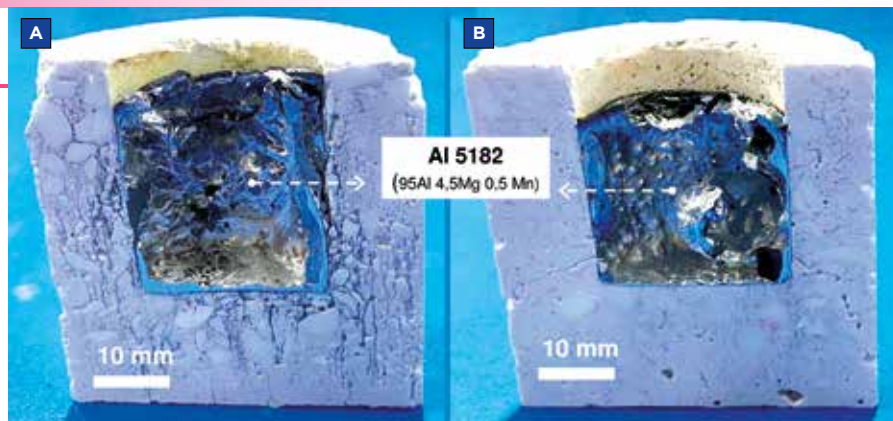
Apesar dessas complexidades, os CACs apresentam vantagens relevantes (Tabela 1): ganho rápido de resistência mecânica, permitindo desmolde precoce; compatibilidade com diversos agregados; e processamento relativamente simples. Além disso, ajustes na formulação permitem reduzir os efeitos indesejáveis associados às fases ricas em cálcio.

### 3.2 Sílica coloidal (SC)

Os concretos ligados com sílica coloidal (SC) representam uma alternativa avançada aos sistemas hidráulicos, com foco na redução das fases de baixa refratariedade e no aumento do desempenho em altas temperaturas (5,6,9,11). A SC é uma dispersão aquosa de partículas nanométricas de  $\text{SiO}_2$  amorfa, cuja aplicação industrial se consolidou a partir da década de 1990, impulsionada pelas tecnologias sol-gel (15,16).

A consolidação ocorre por gelificação, na qual a desestabilização das partículas coloidais, decorrente de variações de pH ou da adição de sais, leva à formação de uma rede tridimensional de ligações Si-O-Si (15). Essa rede garante a coesão e a manutenção da geometria após a moldagem (Figura 1b).

Diferentemente dos sistemas com CAC, não ocorre formação de fases hidratadas.



### FIGURA 3

EXEMPLO DE ENSAIO UTILIZADO PARA AVALIAR A RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS DEVIDO À INFILTRAÇÃO DE LIGA DE ALUMÍNIO 5182 FUNDIDA (820 °C, POR 24 H): CONCRETOS REFRAATÓRIOS À BASE DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) LIGADOS COM A) CIMENTO DE ALUMINATO DE CÁLCIO (CAC) OU COM B) SÍLICA COLOIDAL (SC), PREVIAMENTE SINTERIZADOS A 850 °C POR 48 H

Fonte: REFERÊNCIA (10)

Assim, os concretos com SC apresentam microestrutura inicial mais homogênea, com poros mais finos e menos conectados (9,10,12). Como a água é majoritariamente livre, sua remoção torna a secagem mais previsível, reduzindo os riscos de pressurização de vapor e de defeitos como fissuração ou explosão. Isso permite ciclos de secagem mais rápidos e seguros, embora o controle térmico continue sendo necessário (3).

Na sinterização, acima de 500-600 °C, ocorrem a condensação da sílica e a formação de uma fase vítrea contínua, promovendo a coesão entre os grãos (10). Em sistemas com alumina, há formação de mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) (Figura 2e-f) (11), fase com alta estabilidade térmica, baixa expansão e elevada resistência ao choque térmico. A ausência de fases ricas em cálcio também confere maior resistência química em ambientes agressivos. A microestrutura resultante apresenta menor fração de fases vítreas de baixa viscosidade, o que contribui para a estabilidade dimensional e a resistência à fluência (14).

Entre as principais vantagens dos sistemas com SC, destacam-se (Tabela 1): elevada refratariedade, resistência à abrasão, maior durabilidade em ambientes corrosivos (Figura 3) e menor necessidade de temperaturas elevadas para o desenvolvimento da resistência mecânica (10,12). Além disso, apresentam menor suscetibilidade a problemas de secagem, o que reduz os tempos de comissionamento e os riscos durante o aquecimento inicial. Recentemente, a modificação superficial das

nanopartículas de sílica com agentes silanos e siloxanos permitiu o emprego desses ligantes em sistemas à base de MgO (17).

### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os concretos refratários são materiais de engenharia desenvolvidos para operar em condições térmicas e químicas severas, cujo desempenho depende do sistema ligante. Esses agentes influenciam todas as etapas do ciclo de vida, desde o processamento até o uso e a reciclagem. Sistemas com cimento de aluminato de cálcio (CAC) são amplamente utilizados devido à facilidade de processamento, à elevada resistência mecânica inicial e ao desempenho adequado em diversas aplicações. Em contraste, ligantes à base de sílica coloidal (SC) representam uma alternativa mais avançada, com maior homogeneidade, estabilidade termoquímica e confiabilidade em serviço. As diferenças nos mecanismos de consolidação afetam diretamente a permeabilidade, a secagem e a segurança durante o aquecimento inicial. A escolha do ligante deve considerar sua compatibilidade com as matérias-primas e com o ambiente de aplicação. Avanços no desenvolvimento desses sistemas continuam aprimorando o desempenho e a vida útil dos concretos refratários.

### AGRADECIMENTOS

CAPES (Financiamento 001); CNPq (147526/2021-3; 140930/2022-1; 311010/2023-7); FAPESP (2022/03655-7; 2025-12394-0). ©

## ▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma ABNT NBR 8826, Materiais refratários - Terminologia, Segunda edição (30.10.2014). ISBN 978-85-07-05201-2.
- [2] Norma ABNT NBR 10237, Materiais refratários - Classificação, Segunda edição (29.10.2014). ISBN 978-85-07-05200-5.
- [3] Nishikawa, A. Technology of monolithic refractories (1984) PLIBRICO, Tokyo, pp. 33-37.
- [4] Lee W.E., Moore R.E. Evolution of in situ refractories in 20th century (1998) J. Am. Cer. Soc. 81 (6), pp. 1385-1410.
- [5] Banerjee, S. Recent developments in monolithic refractories (1998) Am. Cer. Soc. Bull. 77 (10), pp. 59-63.
- [6] Roy, J. *et al*, Nanotechnology in castable refractory (2019) Cer. Int. 45 (1) pp. 19-29.
- [7] Salomão, R. *et al*, Hydraulic binders for refractory castables: Mixing, curing and drying (2007) CFI Cer. For. Int. 84 (9), pp. E103-E108.
- [8] Salomão, R. *et al*, Calcium aluminate cement in castable alumina: From hydrate bonding to the *in situ* formation of calcium hexaluminate (2021) Cer. Int. 47 (11), pp. 15082-15093
- [9] Ismael, M.R. *et al*, Optimization of the particle size distribution of colloidal silica containing refractory castables (2007) InterCeram: Int. Cer. Rev. pp. 34-39.
- [10] Salomão, R. *et al*, Colloidal silica-bonded high-alumina refractory castables: Systemic analysis from casting, curing, and drying up to contact with molten aluminum (2025) Proceedings of 19th Biennial Worldwide Congress on Refractories - UNITECR 2025. Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Refractarios. Cancún, México, pp. 127-130.
- [11] Soury, A.R., Kashaninia, F. The effect of nano-structured colloidal silica on the properties of tabular alumina castables (2008) InterCeram: Int. Cer. Rev. 57 (6), pp. 414-416.
- [12] Ismael, M.R. *et al*, Refractory Castables Based on Colloidal Silica and Hydratable Alumina (2007) Am. Cer. Soc. Bull. 86 (9), pp. 58-61.
- [13] Innocentini, M.D.M. *et al*, Drying stages during the heating of high-alumina, ultra-low-cement refractory castables (2003) J. Am. Cer. Soc. 86 (7), pp. 1146-1148
- [14] Wynn, A.M. Testing of castable refractories for resistance to molten aluminium alloys (1992) Brit. Cer. Trans. 91 (5) 153-158.
- [15] Iller, R.K. The chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloid and surface properties (1979) 1st Ed., Wiley & Sons, ISBN: 047102404X, New York, pp. 40-49, 364-366, 624-637.
- [16] Roberts, W.O. Colloidal Silica: Fundamentals and Applications (2005) CRC Press, ISBN: 9780429116582 Boca Raton, pp. 131-175.
- [17] Salomão, R. *et al*, Novel silanized colloidal silica-MgO self-flowing dispersions with improved hydroxylation resistance (2023) J. Eur. Cer. Soc. 43 (13), pp. 5691-5705.

### VERGALHÃO GG 70

PRODUTIVIDADE | ECONOMIA | SUSTENTABILIDADE

Conheça a solução que combina, como nenhuma outra, alta performance e redução de custos com menor impacto ao meio ambiente.

## O VERGALHÃO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA TODAS AS OBRAS

Otimização de insumos diretos e indiretos.  
40% mais resistência, reduzindo a quantidade de barras necessárias.

### CONHEÇA ALGUMAS DAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES DO GG 70:

Blocos de coroamento  
Pilares de edifícios altos  
Contenções  
Vigas de transição  
Núcleos rígidos de edifícios  
Obras de Infraestrutura  
Pré-fabricados

BAIXE O EBOOK:



- Nova nervura transversal exclusiva e diferente do GG 50
- 700MPa de limite mínimo de resistência ao escoamento
- Disponível nas bitolas de 12,5mm a 32mm
- 100% soldável

ALTA RESISTÊNCIA INÚMERAS POSSIBILIDADES

Projete e desenvolva com mais eficiência, economia e sustentabilidade.

 **GERDAU**  
O futuro se molda

[mais.gerdau.com.br](http://mais.gerdau.com.br)

