

Artigo

Rotas de síntese do Aluminato de Cálcio (CaAl_2O_4): uma revisão sistemática da literatura Calcium Aluminate (CaAl_2O_4) synthesis routes: a systematic literature review

Romeu de Oliveira Felizardo¹, Allexya Giovanna do Nascimento Policarpo², Andréia Matos Brito³, Bruno Wallace Barros Caldas⁴ & Antônio Nunes de Oliveira⁵

¹Licenciatura em Física (UFC), mestre em ensino de Física (URCA). Docente no Instituto Federal do Ceará, Doutorando em Ciência dos Materiais (UNIVASF). E-mail: romeu.oliveira@ifce.edu.br.

²Engenheira Civil UNINASSAU- Petrolina, Mestranda em Ciência dos Materiais (UNIVASF). E-mail: giopolicarpo@hotmail.com.

³Engenheira de Produção Mecânica (URCA), Doutoranda em Ciência dos Materiais (UNIVASF). Docente no Instituto Federal do Ceará. E-mail: andreia.matos@ifce.edu.br.

⁴Licenciatura em Física – IFSertão, Mestre em ensino de física-(UNIVASF). E-mail:caldaswbwbc@gmail.com.

⁵Doutor em Engenharia de Processos Pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Docente no Instituto Federal do Ceará. E-mail: nunes.vieira@ifce.edu.br.

Resumo: Este artigo apresenta uma revisão sistemática das rotas de síntese aplicadas ao aluminato de cálcio (CaAl_2O_4) entre 2015 e 2025, com o objetivo de identificar, organizar e analisar criticamente os métodos empregados. A seleção dos estudos seguiu critérios rigorosos de elegibilidade, incluindo idioma, acesso aberto, avaliação por pares e foco explícito na síntese do material. Foram incluídos 14 artigos que descrevem métodos como reação em estado sólido, combustão em solução, rotas sol-gel (tradicional, Pechini, citrato-nitrato), sinterização assistida por sais fundidos, espumação direta e estratégias híbridas. Os resultados evidenciam o predomínio de técnicas que conciliam controle morfológico, redução da temperatura de síntese e eficiência energética. Rotas úmidas, especialmente as variações do método sol-gel, destacam-se por viabilizar a obtenção de pós nanocristalinos com propriedades luminescentes. Além disso, observa-se uma tendência crescente na modificação de cimentos de aluminato de cálcio por reações ácido-base com polifosfatos, ampliando o escopo de aplicação do material. Esta revisão contribui para a consolidação do conhecimento na área ao reunir informações dispersas, oferecendo subsídios para o planejamento de rotas sintéticas mais eficazes, sustentáveis e adaptadas a diferentes finalidades tecnológicas.

Palavras-chave: Aluminato de cálcio; Rotas de síntese; Engenharia de materiais.

Abstract: This article presents a systematic review of the synthesis routes applied to calcium aluminate (CaAl_2O_4) between 2015 and 2025, aiming to identify, organize, and critically analyze the methods employed. The selection of studies followed strict eligibility criteria, including language, open access, peer review, and explicit focus on material synthesis. Fourteen articles were included, describing methods such as solid-state reaction, solution combustion, sol-gel routes (traditional, Pechini, citrate-nitrate), molten salt-assisted sintering, direct foaming, and hybrid strategies. The results highlight a predominance of techniques that combine morphological control, reduced synthesis temperatures, and energy efficiency. Wet chemical routes, particularly sol-gel variations, stand out for enabling the production of nanocrystalline powders with luminescent properties. Furthermore, a growing trend is observed in the chemical modification of calcium aluminate cements through acid-base reactions with polyphosphates, expanding the material's application scope. This review contributes to the consolidation of knowledge in the field by compiling previously scattered information, offering valuable insights for the planning of more effective, sustainable, and application-oriented synthetic approaches.

Keywords: Calcium aluminate; Synthesis routes; Materials engineering.

1 Introdução

O aluminato de cálcio (CaAl_2O_4) é um material cerâmico amplamente estudado por suas propriedades estruturais, luminescentes e catalíticas, com aplicações que vão desde cimentos especiais até fósforos de pós-brilho e suportes para catalisadores metálicos (HUANG, Zefeng et al., 2023). Dentre as fases possíveis, o monoaluminato de

cálcio se destaca por sua estabilidade térmica, estrutura cristalina versátil e capacidade de incorporar dopantes que modificam suas propriedades ópticas e eletrônicas (HUSSAIN, A. et al., 2016).

Nesse contexto, Hussain et al. (2022), afirmam que a escolha da rota de síntese é um fator determinante, pois influencia diretamente a morfologia, a cristalinidade,

Aceito para publicação em: 10 de março de 2026 e publicado em: 22 de março de 2026.

o desempenho funcional e a reprodutibilidade dos materiais obtidos. Diversos métodos vêm sendo propostos na literatura, como a reação em estado sólido, a rota sol-gel e a combustão em solução, com adaptações importantes nos últimos anos para otimização da temperatura de síntese, controle de fase e incorporação de elementos dopantes.

Nos últimos anos, observa-se um aumento no número de estudos que buscam rotas sintéticas mais eficientes, econômicas e ambientalmente adequadas, incluindo variações híbridas e o uso de precursores alternativos. Porém, a literatura permanece fragmentada quanto à sistematização e comparação entre os métodos, dificultando a escolha racional da técnica mais apropriada para cada aplicação. Além disso, muitos trabalhos priorizam a aplicação do material final sem detalhar adequadamente o processo de obtenção, o que compromete a reprodutibilidade e o entendimento dos mecanismos envolvidos na formação das fases desejadas. Assim, há uma clara lacuna na consolidação crítica das rotas de síntese utilizadas para o CaAl_2O_4 , sobretudo em relação à descrição dos parâmetros experimentais, eficiência energética e controle sobre as propriedades finais do material.

O foco de investigação neste trabalho é a diversidade de rotas de síntese utilizadas para a obtenção do aluminato de cálcio (CaAl_2O_4), classificando e analisando as metodologias. A maneira como o material é sintetizado afeta diretamente sua composição de fases, estrutura cristalina, tamanho de partícula, área superficial e desempenho funcional, fatores essenciais para aplicações específicas como fósforos luminescentes, matrizes cerâmicas e suportes catalíticos (NAIR, Govind B.; SWART, H. C.; DHOBLE, S. J., 2020). Sendo assim, compreender como diferentes estratégias de síntese influenciam esses atributos é fundamental para otimizar o desempenho dos materiais e desenvolver rotas mais eficientes, sustentáveis e adaptáveis a diferentes escalas de produção.

A sistematização e análise crítica das metodologias de síntese contribui diretamente para suprir a lacuna existente na literatura ao fornecer uma visão consolidada e atualizada sobre as técnicas mais utilizadas, suas vantagens, limitações e contextos de aplicação. Ao identificar padrões, tendências recentes e variações metodológicas, este estudo oferece subsídios relevantes tanto para pesquisadores iniciantes quanto para especialistas da área que buscam desenvolver novos materiais à base de CaAl_2O_4 com maior controle de propriedades e menor impacto ambiental. Dessa forma, a revisão contribui não apenas para o avanço do conhecimento técnico, mas também para a racionalização da escolha de rotas sintéticas em projetos futuros.

Assim, o objetivo deste artigo é realizar uma revisão sistemática da literatura recente a fim de identificar, classificar e discutir criticamente as principais metodologias de síntese aplicadas ao aluminato de cálcio, destacando tendências, inovações e limitações ainda existentes no campo.

2 Material e Métodos

Esta pesquisa foi estruturada como uma revisão sistemática da literatura, com o objetivo de identificar as metodologias de síntese aplicadas ao aluminato de cálcio (CaAl_2O_4) entre 2015 e 2025. A condução da revisão seguiu um protocolo estruturado, visando garantir rigor metodológico, reprodutibilidade e qualidade científica na seleção e análise das evidências.

A busca bibliográfica foi realizada na plataforma do Portal de Periódicos da CAPES, utilizando os seguintes descritores: "*CaAl2O4*", "*calcium aluminate synthesis*" e "*synthesis of monocalcium aluminate*". A pesquisa foi aplicada ao contexto das áreas de Química, Engenharias, Física Aplicada e Ciências Exatas e da Terra. Foram utilizados filtros específicos para refinar os resultados: publicações no idioma inglês, no período de 2015 a 2025, com acesso aberto, avaliadas por pares, do tipo artigo científico (excluindo revisões), e pertencentes às editoras Elsevier BV, Springer Science+Business Media, American Institute of Physics, Springer Nature e American Chemical Society.

A coleta de dados foi realizada de forma colaborativa por três autores independentes, que aplicaram os mesmos filtros e estratégias de busca. Após a triagem inicial, que consistiu na leitura de títulos e resumos, cada autor selecionou os artigos que considerou relevantes. Em seguida, foi feita uma comparação entre as listas obtidas individualmente e foram mantidos apenas os artigos que apresentaram concordância entre pelo menos dois dos três autores. Esse critério visou aumentar a consistência na seleção e minimizar vieses individuais.

Os artigos selecionados foram organizados e gerenciados com o auxílio do software Zotero, que permitiu a eliminação de duplicatas e o controle eficiente das referências. Posteriormente, procedeu-se à leitura completa dos artigos incluídos para extração dos dados relevantes, como a técnica de síntese empregada, métodos de caracterização aplicados e características do produto.

Os dados extraídos passaram por um processo de categorização e análise qualitativa descritiva, com ênfase na comparação entre as diferentes metodologias empregadas para a obtenção do CaAl_2O_4 . Foram observadas tendências recorrentes nas rotas de síntese e discutidas as possíveis vantagens e limitações de cada abordagem.

3 Resultados e Discussão

A aplicação dos descritores e dos filtros estabelecidos na metodologia resultou na seleção inicial de 27 artigos. Utilizando o descritor "*CaAl2O4*", foram encontrados 5 artigos, dos quais 1 foi descartado por não apresentar descrição de processo de síntese, totalizando 4 artigos elegíveis. Com o descritor "*calcium aluminate synthesis*", foram identificados 20 artigos, sendo que 12 foram excluídos por não abordarem diretamente a síntese do material em questão, resultando em 8 artigos selecionados. Por fim, a busca com o descritor "*synthesis of monocalcium aluminate*" retornou 2 artigos, ambos pertinentes aos critérios da pesquisa e, portanto, incluídos na análise final. Esses resultados compõem o corpus da presente revisão sistemática, totalizando 14 artigos analisados quanto às metodologias de síntese aplicadas ao aluminato de cálcio.

A tabela abaixo apresenta um resumo dos métodos de síntese utilizados em cada artigo selecionado, organizados em ordem cronológica de publicação.

Tabela 1: Métodos de síntese do CaAl_2O_4

Título	Autores	Ano de publicação	Rota de síntese utilizada
<i>Effect of Ca addition on interface formation in Al(Ca)/Al₂O₃ composites prepared by gas pressure assisted infiltration</i>	NOSKO, M. et al.	2016	Infiltração assistida por gás
<i>d-f luminescence of Ce³⁺ and Eu²⁺ ions in BaAl₂O₄, SrAl₂O₄ and CaAl₂O₄ phosphors – Combustão em fase única</i>	GEDEKAR, K. A. et al.	2017	Combustão em fase única
<i>Influence of mixing solution on characteristics of calcium aluminate cement modified with sodium polyphosphate</i>	IRISAWA, Keita; GARCIA-LODEIRO, Inés; KINOSHITA, Hajime	2020	Ácido-base como polifosfato
<i>The physical basis of persistence luminescence in CaAl₂O₄ lattice based afterglow phosphors</i>	SINGH, Moirangthem Nara; GARTIA, R. K.	2021	Sol-gel assistida por combustão
<i>Aerogel synthesis of calcium aluminates with varied stoichiometry – sol-gel com secagem supercrítica</i>	ILYINA, Ekaterina V. et al.	2022	Sol-gel com secagem supercrítica
<i>Photoluminescence and afterglow of Dy³⁺ doped CaAl₂O₄ derived via sol-gel combustion – Sol-gel assistida por combustão</i>	ZHAI, Bao-gai; CHEN, Meng Meng; HUANG, Yuan Ming	2022	Sol-gel assistida por combustão
<i>Influence of temperature and polyphosphate contents on hydroxyapatite crystallization in calcium aluminate cement modified with sodium polyphosphate</i>	HANAWA, Mio; KITA, Yoshiha; IRISAWA, Keita	2024	Ácido-base como polifosfato
<i>A novel strategy for low-temperature fabrication of porous CA6 ceramics using reactive CaCl₂-KCl medium and its influence mechanism</i>	LI, Wenfeng et al.	2024	Sinterização assistida por fase líquida indireta
<i>Synthesis and thermoluminescence characteristics of beta irradiated nanocrystalline calcium aluminate doped with lanthanum oxides</i>	SALAH, Abeer et al.	2024	Sol-gel tradicional
<i>Effects of synthesis temperature on the structural and optical properties of CaAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺ nanoparticles</i>	NDUNGUWAITHIRA, Samuel et al.	2024	Combustão em solução
<i>Effect of La₂O₃ doping on the structure and catalytic performance of sintering laminated calcium aluminate supports</i>	SUN, Zhichao et al.	2025	Reação de estado sólido
<i>Preparing porous calcium hexaluminate (CA6) ceramics with calcium aluminate cement (CAC) as the gelling agent and sole calcia source</i>	LU, Haiyang et al.	2025	Espumação direta
<i>Synthesis of calcium aluminate hydrates, their characterization and dehydration</i>	KOPLÍK, Jan et al.	2025	Estado sólido e sol-gel (Pechini modificada)
<i>Calcium and strontium aluminates composite for long-afterglow applications</i>	CHENG, Pei-Tzu et al.	2025	Sol-gel assistida por citrato-nitrato

Nosko et al. (2016), utilizam a técnica de infiltração assistida por pressão de gás como rota de síntese para a fabricação de compósitos de matriz metálica de alumínio reforçados com partículas cerâmicas de Al_2O_3 e ligas de Al-Ca. O processo envolve a infiltração de ligas líquidas de alumínio contendo 1, 2 e 4% em peso de cálcio

em camadas de pó de Al_2O_3 , previamente tratadas termicamente a $950\text{ }^\circ\text{C}$ por duas horas, a fim de melhorar a molhabilidade das partículas. A infiltração ocorre sob vácuo (100 Pa) e pressão de 4 MPa de argônio, também a $950\text{ }^\circ\text{C}$, seguida de resfriamento controlado. Algumas amostras foram submetidas a recozimento a $735\text{ }^\circ\text{C}$ por

diferentes tempos para avaliar a evolução da interface. A adição de cálcio na liga favorece reações com o Al_2O_3 , levando à formação de fases interfaciais como CaAl_2O_4 e CaAl_4O_7 , responsáveis por promover melhor adesão entre matriz e reforço. Essa rota metalúrgica é típica na produção de compósitos metal-matriz, especialmente quando se busca controle interfacial e propriedades mecânicas aprimoradas por meio da formação *in situ* de aluminatos de cálcio.

Gedekar et al. (2017), utilizam a rota de síntese por combustão em fase única como método principal para a obtenção de materiais fosforescentes à base de aluminatos de metais alcalino-terrosos, dopados com íons Ce^{3+} e Eu^{2+} . A metodologia emprega uma mistura estequiométrica de nitratos metálicos — incluindo nitrato de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), nitrato de alumínio ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) e os nitratos dos íons dopantes — combinados com ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), que atua como combustível. A mistura é homogeneizada em almofariz e posteriormente aquecida em mufla a 600°C , temperatura na qual ocorre a ignição da reação. O processo é altamente exotérmico, com liberação rápida de gases como NO_x , NH_3 , CO_2 e H_2O , resultando na formação imediata do pó fosforescente. Para obtenção da fase Eu^{2+} , foi necessária uma etapa adicional de tratamento térmico em atmosfera redutora, realizada com carvão em caixa de aço inoxidável a 800°C por 1h30. Essa rota de síntese por combustão auto-sustentada com nitratos e ureia se destaca por sua simplicidade, rapidez e eficiência na produção de pós com características luminescentes.

Irisawa, Garcia-Lodeiro e Kinoshita (2020), exploram uma rota de síntese baseada em reação ácido-base entre cimento de Aluminato de Cálcio e solução aquosa de polifosfato de sódio, resultando na formação de um sistema denominado CAP (*Calcium Aluminate Phosphate*). A metodologia emprega o cimento anidro Secar® 51 como fonte de alumínio e cálcio, que é incorporado a uma solução de polifosfato preparada com água destilada. A mistura é realizada por meio de um misturador de cisalhamento do tipo Silverson L4RT, garantindo homogeneização eficiente da pasta. Após o preparo, o material é curado em tubos plásticos selados por 28 dias a 20°C , condição que favorece a formação de produtos amorfos como os géis SCOP (*Sodium Calcium Orthophosphate*). A abordagem se diferencia da hidratação convencional do CAC por evitar a formação de fases metastáveis típicas, promovendo uma via alternativa de endurecimento baseada em ligação fosfática.

Singh e Gartia (2021), adotam como principal rota de síntese o método de combustão em solução aquosa para a produção de aluminatos de cálcio (CaAl_2O_4) dopados, com estrutura nanocristalina. A síntese é realizada a partir da dissolução de nitrato de cálcio [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] e nitrato de alumínio [$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$] em água destilada, utilizando ureia como combustível. A solução, preparada em proporções estequiométricas e homogeneizada em agitador magnético por duas horas, é transferida para uma mufla previamente aquecida a cerca de 500°C . Nessa condição, ocorre uma reação de combustão rápida e autocatalítica, caracterizada pela liberação de grandes volumes de gases e formação de uma cinza branca e leve. O material resultante é moído e posteriormente recozido a

900°C por duas horas, etapa que promove a cristalização e aprimora as propriedades estruturais e ópticas do composto. Essa rota de síntese por combustão nitrato-ureia em meio aquoso destaca-se por sua simplicidade, rapidez, baixo custo e pela obtenção de pós finos e porosos com alto rendimento de luminescência persistente, sendo amplamente empregada na produção de fósforos de pós-brilho.

Ilyina et al. (2022), adotam a técnica de síntese por aerogel, também conhecida como rota sol-gel com secagem supercrítica, para a obtenção de aluminatos de cálcio com diferentes razões estequiométricas ($\text{Ca}/\text{Al} = 1/2, 6/7 \text{ e } 3/2$). O processo inicia-se com a preparação da solução de metóxido de cálcio, obtida a partir da reação de cálcio metálico com metanol, seguida da adição do isopropóxido de alumínio, isopropanol e tolueno. A hidrólise controlada com água destilada promove a formação de um gel, que posteriormente passa por secagem em autoclave sob atmosfera de argônio a 265°C e 80 atm, para remoção supercrítica do solvente. Finalmente, as amostras são calcinas a temperaturas entre 500°C e 900°C , promovendo a cristalização das fases de aluminato. Essa rota aerogel ou sol-gel modificada destaca-se por produzir aluminatos de cálcio com alta área superficial, favorecendo aplicações que demandam materiais com propriedades específicas de porosidade e reatividade.

Zhai, Chen e Huang (2022), adotam como rota de síntese principal a técnica de combustão via sol-gel para a produção de fosforescentes de aluminato de cálcio dopados com disprósio ($\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}^{3+}$). O processo utiliza como precursores os nitratos de cálcio e alumínio, óxido de disprósio (Dy_2O_3), ureia como combustível e ácido bórico como fundente. Após a dissolução completa dos reagentes em água deionizada, a solução é submetida à agitação magnética vigorosa por 60 minutos e envelhecida à temperatura ambiente por duas semanas. A mistura envelhecida é então transferida para cadinhos de alumina e submetida ao aquecimento em mufla a 780°C , onde ocorre uma combustão rápida por autoignição, atingindo temperaturas de até 1300°C em cerca de 40 segundos. O resfriamento é realizado naturalmente, sem necessidade de calcinação adicional. Essa rota permite a formação de pós nanocristalinos com alta área superficial, ricos em vacâncias de oxigênio e cálcio, o que contribui significativamente para o desempenho óptico dos materiais, em especial suas propriedades de brilho residual.

Hanawa, Kita e Irisawa (2024), investigam a síntese de materiais a partir da modificação do cimento de aluminato de cálcio por meio de uma solução aquosa de polifosfato de sódio, formando o sistema denominado CAP (*Calcium Aluminate Phosphate*). Diferentemente da hidratação convencional do CAC, a solidificação ocorre por uma reação ácido-base, evitando a formação de fases metastáveis comuns nos cimentos tradicionais. A metodologia consiste na mistura manual do cimento anidro Secar 51 com soluções aquosas de polifosfato em diferentes proporções, seguida de vibração para eliminar bolhas. Após uma cura inicial de sete dias a 25°C , em que se forma uma fase amorfa semelhante a géis do tipo SCOP (*Sodium Calcium Orthophosphate*), as amostras passam por tratamento térmico em temperaturas entre 60 e 150°C durante 22 horas, promovendo a cristalização da

hidroxiapatita (HAp) e da boehmita (γ -AlOOH). Essa rota química via reação ácido-base com posterior tratamento térmico apresenta vantagens ao favorecer a formação direta dessas fases estáveis, diferenciando-se dos processos tradicionais de hidratação do CAC e abrindo possibilidades para aplicações biomateriais.

Li et al. (2024), utilizam como principal estratégia de síntese o método de sinterização assistida por fase líquida indireta, empregando uma mistura eutética de sais CaCl_2 -KCl como meio reativo para a fabricação de cerâmicas porosas de hexaluminato de cálcio (CaAl_2O_4 , CA6). Os reagentes de partida são CaCO_3 e $\text{Al}(\text{OH})_3$, utilizados em proporções estequiométricas, aos quais se adiciona entre 10 e 20% em peso da mistura CaCl_2 -KCl (1:1 molar). Esta mistura atua simultaneamente como fonte adicional de CaO, meio fundido facilitador das reações em estado sólido e agente porogênico, devido à volatilização do KCl e à formação de AlCl_3 gasoso durante o aquecimento. O processo inclui moagem por bolas, moldagem uniaxial, secagem e sinterização entre 1100 °C e 1600 °C por três horas. A formação da fase CA6 é descrita como resultado de reações sucessivas entre CaO e Al_2O_3 , iniciando por volta de 1100 °C e sendo praticamente completada a 1300 °C, valor significativamente inferior ao requerido por rotas convencionais. Essa rota, portanto, representa uma abordagem eficiente para a síntese de CA6 porosa a temperaturas mais baixas, com potencial para economia energética e controle de microestrutura.

Salah et al. (2024), aplicam a rota sol-gel convencional para a síntese de aluminato de cálcio (CaAl_2O_4) nanocristalino dopado com óxido de lantânio (La_2O_3), visando a obtenção de materiais com propriedades luminescentes aprimoradas. O processo utiliza como precursores acetato de cálcio [$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$], acetato de alumínio [$(\text{CH}_3\text{COO})_3\text{Al}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$] e óxido de lantânio, todos dissolvidos em água destilada sob agitação magnética durante uma hora, à temperatura ambiente. A solução resultante passa por gelificação durante dois dias, promovendo a transição do sol para o gel. O material é então filtrado, lavado e seco a 100 °C, sendo posteriormente submetido a tratamento térmico (calcinação) a 800 °C por cerca de duas horas. Essa síntese por método sol-gel seguida de calcinação se destaca pela simplicidade e capacidade de produzir pós nanocristalinos homogêneos, com boa dispersão do dopante e estrutura adequada para aplicações em dispositivos fotônicos e materiais fosforescentes.

Ndunguathira et al. (2024), utilizam como principal rota de síntese o método de combustão em solução (*Solution Combustion Synthesis – SCS*) para a obtenção de nanopartículas de aluminato de cálcio dopadas com Eu^{2+} e Dy^{3+} ($\text{CaAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$, Dy^{3+}). A metodologia emprega os sais metálicos $\text{Al}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Dy}(\text{NO}_3)_3$ e $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, dissolvidos em água deionizada juntamente com ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), que atua como combustível. Após agitação magnética por 15 minutos para homogeneização, a solução é transferida para cadinhos e levada à mufla, sendo submetida a temperaturas entre 300 e 1000 °C. O processo desencadeia uma ignição espontânea e combustão rápida, com liberação de gases como NO_x , CO_2 e NH_3 , resultando na formação de um material espumoso característico. O produto é então

resfriado e moído para posterior caracterização. Essa destaca-se pela simplicidade, rapidez e eficiência na produção de pós finos, homogêneos e com excelente desempenho luminescente, sendo amplamente aplicada na síntese de materiais fosforescentes de brilho persistente.

Sun et al. (2025), utilizam na sua metodologia a rota de síntese por reação em estado sólido para a preparação de suportes cerâmicos de aluminato de cálcio (CaAl_2O_4). O processo envolve a sinterização de uma estrutura laminar porosa através da reação de alta temperatura entre os precursores $\text{Al}(\text{OH})_3$, CaCO_3 e La_2O_3 , usados respectivamente como fontes de alumínio, cálcio e modificador. O tratamento térmico é realizado em temperaturas elevadas, entre 1300 e 1400 °C, característico dessa técnica, garantindo a formação da fase desejada. Posteriormente, os catalisadores Ni/CA são preparados pelo método de impregnação com solução aquosa supersaturada de nitrato de níquel, seguido de calcinação, demonstrando a aplicação prática do material como suporte catalítico.

Lu et al. (2025), empregam a rota de espumação direta para a síntese de cerâmicas porosas de hexaluminato de cálcio (CaAl_2O_4 , CA6). A metodologia utiliza o cimento de Aluminato de Cálcio (CAC) como agente gelificante e única fonte de cálcio, combinado com três tipos distintos de alumina (tabular, esférica e ultrafina de alta pureza). A síntese começa com a mistura estequiométrica de alumina e CAC, seguida por moagem em moinho planetário por uma hora. Posteriormente, a mistura é incorporada a uma solução contendo hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e submetida à espumação mecânica direta utilizando o agente espumante dodecil sulfato de sódio (SDS). Após a moldagem e secagem em etapas controladas de temperatura, o material passa por um tratamento térmico final de até 1650 °C, processo que promove a formação da fase CA6 por meio de reações em estado sólido entre o CAC e a alumina. A amostra com melhor desempenho foi obtida com alumina ultrafina e calcinação a 1650 °C, destacando a influência dos parâmetros de síntese na microestrutura e propriedades finais do material.

Koplik et al. (2025), investigam uma abordagem híbrida para a síntese de hidratos de aluminato de cálcio (CAHs), utilizando duas rotas distintas para a obtenção dos precursores anidros, seguidas de uma etapa de hidratação controlada. A primeira rota consiste na síntese em estado sólido de alta temperatura (HT), baseada na reação entre CaCO_3 e Al_2O_3 em proporção estequiométrica. Após um aquecimento inicial a 900 °C para decomposição do carbonato de cálcio, a sinterização é conduzida entre 1360 e 1600 °C por cinco horas, variando de acordo com a fase desejada, como CA, CA_2 , C_{12}A_7 ou C_3A . A segunda rota adotada é a síntese Pechini modificada (PS), que utiliza nitratos de cálcio e alumínio em meio ácido, com ácido cítrico como agente quelante. O processo envolve formação de gel, secagem a 200 °C, calcinação a 400 °C e tratamento térmico final entre 900 e 1200 °C para obtenção das fases aluminato. Os aluminatos sintetizados por ambas as rotas foram então submetidos à hidratação controlada em meio aquoso, realizada em temperaturas entre 5 e 60 °C durante 48 horas, permitindo a formação seletiva de diferentes hidratos como CAH_{10} , C_2AH_8 , C_3AH_6 , AH_3 ,

C_4AH_{13} e C_4ACH_{11} , em função da fase precursora e da temperatura de hidratação. Essa abordagem integrada combina rotas térmicas e químicas de síntese, seguida de modulação das fases hidratadas, sendo relevante para aplicações em sistemas cimentícios avançados.

Cheng et al. (2025), empregam uma versão modificada do método Pechini, denominada pelos próprios autores como método de sol-gelatinização, para a síntese de materiais fosforescentes à base de aluminatos de cálcio ($CaAl_2O_4:Eu^{2+},Dy^{3+}$) e estrôncio ($SrAl_2O_4$ e $Sr_3Al_2O_6:Eu^{2+},Dy^{3+}$). A metodologia utiliza como precursores os nitratos de cálcio, estrôncio e alumínio, além de ácido cítrico como agente quelante, em uma razão molar de 1:2 entre os nitratos e o ácido. A mistura é aquecida até cerca de 200 °C, promovendo a formação de uma espuma, que é posteriormente seca, moída e peneirada. Os pós obtidos são submetidos a uma etapa inicial de calcinação em atmosfera de ar entre 600 e 900 °C, seguida de um tratamento térmico em atmosfera redutora de monóxido de carbono (CO), alcançando até 1400 °C, com o objetivo de estabilizar a valência Eu^{2+} nas estruturas dopadas. Essa rota de síntese química úmida via complexação orgânica, sem o uso de fundentes como B_2O_3 , permitiu a obtenção de pós-luminescentes com propriedades de emissão prolongada, evidenciando a viabilidade do método para produção de materiais com aplicação em dispositivos de emissão óptica.

Após a análise das metodologias de síntese adotadas para o $CaAl_2O_4$ nos últimos dez anos nota-se uma predominância de rotas baseadas em reações no estado sólido, sol-gel e combustão assistida por solução. A síntese em estado sólido, embora robusta e amplamente utilizada, exige temperaturas elevadas (acima de 1300 °C), longos tempos de sinterização e não permite controle preciso sobre a morfologia ou área superficial dos produtos. Já as rotas sol-gel, incluindo variações como o método Pechini e sol-gelatinização, destacam-se por operar a temperaturas mais baixas e por possibilitar maior homogeneidade e controle morfológico, sendo especialmente adequadas para síntese de pós nanocristalinos e materiais luminescentes.

As rotas por combustão em solução, tanto convencionais quanto via sol-gel, demonstraram ser eficazes na produção rápida de aluminatos de cálcio com alta porosidade, boa dispersão dopante e forte resposta óptica. Estas técnicas são economicamente vantajosas e energeticamente eficientes, embora exijam precauções quanto ao controle da estequiometria e da reatividade dos precursores para evitar fases secundárias. Adicionalmente, abordagens híbridas, como a sinterização assistida por sais fundidos ($CaCl_2-KCl$) e a hidratação controlada de aluminatos sintetizados por rotas térmicas e químicas, demonstraram potencial para modular a microestrutura e expandir as propriedades funcionais dos materiais, embora ainda sejam menos exploradas.

Observa-se também o uso crescente de modificações em cimentos de aluminato de cálcio por reações ácido-base com polifosfatos, indicando uma tendência em integrar soluções da química de cimentos com rotas cerâmicas avançadas. Essa diversidade metodológica reflete o esforço da comunidade científica em adaptar a rota de síntese conforme a aplicação final desejada, seja estrutural ou óptica, balanceando fatores

como custo, controle de fase, morfologia e desempenho funcional.

4 Conclusão

Os principais resultados evidenciaram uma diversidade metodológica significativa, com destaque para rotas de combustão em solução, métodos sol-gel (incluindo variações como Pechini e sol-gelatinização) e a síntese em estado sólido de alta temperatura, cada uma com suas vantagens em termos de controle morfológico, custo e eficiência energética.

O trabalho contribui ao fornecer um panorama atualizado que pode orientar futuras escolhas metodológicas em pesquisas envolvendo aluminatos de cálcio, especialmente em aplicações fotônicas, catalíticas e estruturais. No entanto, algumas limitações metodológicas foram encontradas, como a ausência de padronização na descrição dos processos sintéticos em parte dos artigos analisados e a exclusão de estudos relevantes por estarem fora dos critérios de acesso aberto ou por não informarem claramente os procedimentos de síntese. Apesar dessas restrições, os resultados obtidos reforçam a relevância da sistematização crítica como ferramenta de suporte ao desenvolvimento científico na área de materiais cerâmicos.

Referências

CHENG, Pei-Tzu et al. Calcium and Strontium Aluminates Composite for Long-afterglow Applications. **Ceramics International**, 2025.

GEDEKAR, K. A. et al. d-f luminescence of Ce 3+ and Eu 2+ ions in BaAl 2 O 4, SrAl 2 O 4 and CaAl 2 O 4 phosphors. **Journal of Advanced Ceramics**, v. 6, p. 341-350, 2017.

HANAWA, Mio; KITA, Yoshiha; IRISAWA, Keita. Influence of temperature and polyphosphate contents on hydroxyapatite crystallization in calcium aluminate cement modified with sodium polyphosphate. **Construction and Building Materials**, v. 449, p. 138503, 2024.

HUANG, Zefeng et al. Smart mechanoluminescent phosphors: a review of strontium-aluminate-based materials, properties, and their advanced application technologies. **Advanced Science**, v. 10, n. 3, p. 2204925, 2023.

HUSSAIN, A. et al. Electronic structure, mechanical, and optical properties of CaO· Al 2 O 3 system: A first principles approach. **Indian Journal of Physics**, v. 90, p. 917-929, 2016.

HUSSAIN, Iftikhar et al. Factors affecting the growth formation of nanostructures and their impact on electrode materials: A systematic review. **Materials Today Physics**, v. 27, p. 100844, 2022.

ILYINA, Ekaterina V. et al. Aerogel synthesis of calcium aluminates with varied stoichiometry. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 104, n. 2, p. 259-266, 2022.

- IRISAWA, Keita; GARCIA-LODEIRO, Inés; KINOSHITA, Hajime. Influence of mixing solution on characteristics of calcium aluminate cement modified with sodium polyphosphate. **Cement and Concrete Research**, v. 128, p. 105951, 2020.
- KOPLÍK, Jan et al. Synthesis of calcium aluminate hydrates, their characterization and dehydration. **Ceramics International**, v. 51, n. 5, p. 5536-5543, 2025.
- LI, Wenfeng et al. A novel strategy for low-temperature fabrication of porous CA6 ceramics using reactive CaCl₂-KCl medium and its influence mechanism. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 44, n. 12, p. 7201-7209, 2024.
- LU, Haiyang et al. Preparing porous calcium hexaluminate (CA6) ceramics with calcium aluminate cement (CAC) as the gelling agent and sole calcia source. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 1010, p. 177625, 2025.
- NAIR, Govind B.; SWART, H. C.; DHOBLE, S. J. A review on the advancements in phosphor-converted light emitting diodes (pc-LEDs): Phosphor synthesis, device fabrication and characterization. **Progress in Materials Science**, v. 109, p. 100622, 2020.
- NDUNGUWAITHIRA, Samuel et al. Effects of synthesis temperature on the structural and optical properties of CaAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺ nanoparticles. **Scientific African**, v. 26, p. e02435, 2024.
- NOSKO, M. et al. Effect of Ca addition on interface formation in Al (Ca)/Al₂O₃ composites prepared by gas pressure assisted infiltration. **Materials & Design**, v. 108, p. 618-623, 2016.
- SALAH, Abeer et al. Synthesis and thermoluminescence characteristics of beta irradiated nanocrystalline calcium aluminate doped with lanthanum oxides. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 218, p. 111571, 2024.
- SINGH, Moirangthem Nara; GARTIA, R. K. The physical basis of persistence luminescence in CaAl₂O₄ lattice based afterglow phosphors. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing, 2021.
- SUN, Zhichao et al. Effect of La₂O₃ doping on the structure and catalytic performance of sintering laminated calcium aluminate supports. **Ceramics International**, 2025.
- ZHAI, Bao-gai; CHEN, Meng Meng; HUANG, Yuan Ming. Photoluminescence and afterglow of Dy³⁺ doped CaAl₂O₄ derived via sol-gel combustion. **RSC advances**, v. 12, n. 49, p. 31757-31768, 2022.