

# AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE VALORAÇÃO DA LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO COMO COPRODUTO EM DIFERENTES SETORES

**Autores:** Gustavo Luís Benini <sup>(1)</sup>; Jéssica Fröhlich <sup>(1)</sup>; Feliciane Andrade Brehm <sup>(1)</sup>; Marlova Piva Kulakowski <sup>(1)</sup>; Luis Alcides Schiavo Miranda <sup>(1)</sup>; Regina Célia Espinosa Modolo <sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos)

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos)

## RESUMO

O gerenciamento e a correta disposição final de resíduos gerados em processos industriais requerem cuidados devido aos seus potenciais impactos ambientais. O processo de beneficiamento da madeira para a produção da polpa de celulose pode gerar expressiva quantidade do resíduo lama de carbonato de cálcio, muitas vezes referido na literatura e na indústria como lama de cal. Este artigo visa sintetizar diversos estudos sobre a reutilização desse resíduo como coproduto em diferentes setores, analisando o seu potencial de valorização. A reutilização e reciclagem do resíduo foi analisada nos setores agrícola, construção civil e tratamento de efluentes. Com base na literatura consultada, o estudo concluiu que, no setor agrícola, o resíduo, após beneficiamento, torna-se um produto comercial, utilizado na correção da acidez do solo. Porém, seu emprego em outros setores, embora tenha potencial, necessita de um estudo mais aprofundado nas respectivas áreas.

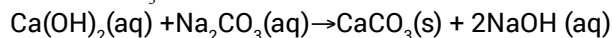
**Palavras-chave:** Impacto Ambiental; Lama de Carbonato de Cálcio; Lama de Cal; Coproduto.

## INTRODUÇÃO

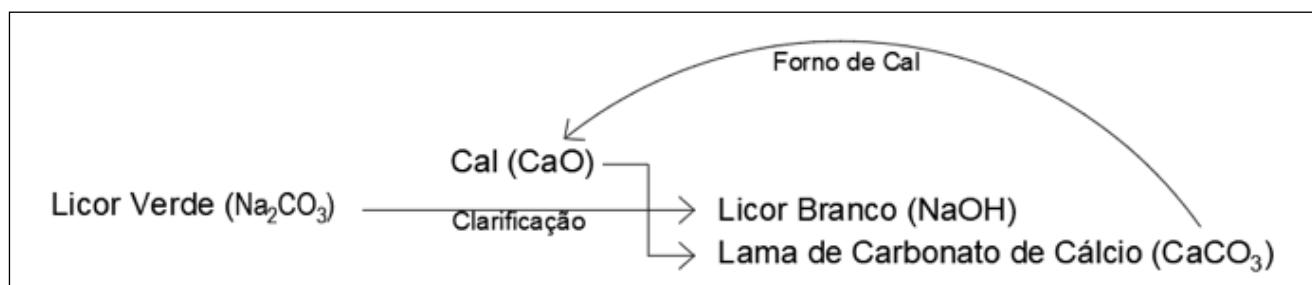
A indústria de papel e celulose gera diversos resíduos ao longo do processo de produção, os quais se diferenciam em relação à composição química e ao estado físico da matéria. A lama de carbonato de cálcio é gerada no processo *kraft* de produção de polpa celulósica. Entre os resíduos estão os dregs, os grits, os resíduo de forno de cal e a lama de carbonato de cálcio.

A lama de carbonato de cálcio é gerada após o processo de clarificação de licor. Posteriormente, ela é recuperada para cal em um forno de cal, durante o ciclo de recuperação química dos produtos utilizados [1,2]. Na Figura 1 é apresentado o ciclo da lama de carbonato de cálcio no processo de clarificação do licor.

As etapas de caustificação (Equação 1), seguida de clarificação, tratam da conversão do licor verde em licor branco e da separação/purificação do licor branco, respectivamente [4]. O licor verde tem composição rica em  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e o branco é rico em  $\text{NaOH}$ . Tal processo gera um precipitado rico em  $\text{CaCO}_3$  de umidade variável [3].



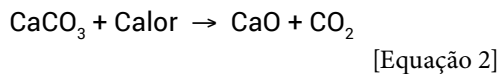
[Equação 1]



**Figura 1.** Esquema de produção de lama de carbonato de cálcio no processo de clarificação do licor

**Autores correspondentes:** Gustavo Luís Benini (gustavolbenini@hotmail.com), Jéssica Frohlich. Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). Av. Unisinos, 950 - Cristo Rei, São Leopoldo - RS, 93022-750.

A lama de carbonato de cálcio, que é introduzida em um forno de estrutura tubular e rotativa, passa por um processo de calcinação, para que se obtenha a cal, e, assim, ela pode ser reutilizada como matéria-prima reposição no processo de conversão de licor verde para licor branco. A calcinação do carbonato de cálcio ocorre conforme a Equação 2.



Apesar de a lama de carbonato de cálcio ser utilizada como matéria-prima na reposição da cal depois do sistema de recuperação, em algumas ocasiões ela se torna resíduo. Isso ocorre quando o processo de realimentação precisa ser interrompido, por exemplo, para a manutenção ou limpeza do forno. Nessas situações, a produção da celulose permanece ativa e, conseqüentemente, a lama de carbonato de cálcio continua sendo gerada, tornando-se resíduo. Ainda há a possibilidade da geração excessiva de carbonato de cálcio, ou seja, uma produção superior à quantidade que a fábrica necessita de cal, tornando o processo de calcinação anti-econômica, pois leva à geração de resíduos [5]. A retirada de lama de carbonato de cálcio também se faz rotineiramente, porque ela vai enriquecendo-se de outros íons indesejáveis, devido ao fechamento dos circuitos. Sua remoção faz-se necessária para que possa ser trocada pelo carbonato de cálcio de maior pureza.

Verificou-se que há um equívoco em relação à nomenclatura desse resíduo. Ele é conhecido na indústria como lama de cal, porém a sua composição química contém teores de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que chega a atingir 97% da massa total, e outros compostos residuais em menor concentração [1]. Dessa forma, levando em conta a composição química e mineralógica, sugere-se para esse resíduo a denominação de lama de carbonato de cálcio, enquanto que cal, denominação dada ao composto  $\text{CaO}$ , é o produto final do processo de recuperação da lama de carbonato de cálcio. Neste artigo, utilizou-se a nomenclatura pertinente à composição química do material, lama de carbonato de cálcio, que, em inglês, pode ser traduzido para *Lime mud* ou *paper kiln sludge* [6].

No levantamento realizado na Indústria Brasileira de Árvores [7], em 2016, foram produzidos 18,8 milhões de toneladas de celulose. Em consequência, foram gerados 14,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos pelas atividades industriais, dos quais a lama de cal e a cinza de caldeira representam 5,0%, ou seja, 700 mil toneladas. Esses dados sugerem que, para cada tonelada de polpa de celulose produ-

zida, descartam-se 37,2 kg de lama de cal e cinza de caldeira. Estudos de Modolo *et al.* [1] estimaram a geração da lama de carbonato de cálcio em cerca de 15 kg por tonelada de polpa de celulose.

A quantidade de resíduo gerada e a preocupação em relação ao risco do impacto ambiental, que ele pode provocar quando descartado incorretamente, motivou o desenvolvimento de diversas pesquisas que tratam da viabilidade de utilizar a lama de cal como coproduto. Entre as aplicações propostas até então, destacam-se o uso como neutralizador de solo (na agricultura), a adição como fíler em argamassas, a correção de pH no tratamento de esgoto e a adição na fabricação de blocos cerâmicos e de telhas. Dessa forma, esta revisão de literatura tem como objetivo sintetizar esses diversos estudos para entender como reutilizar o resíduo como coproduto em diferentes setores, analisando o seu potencial de valorização.

## CARACTERIZAÇÃO DA LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO

A formação do precipitado de carbonato de cálcio ocorre devido à sedimentação de sólidos em água, por isso, há umidade no resíduo. A lama de carbonato de cálcio, quando extraída do processo, apresenta-se como resíduo sólido de coloração branca a acinzentada. Apesar de ser denominada como lama, o teor de umidade não é tão elevado. Amostras de lama de carbonato de cálcio, estudadas por Modolo *et al.* [1], apresentavam cerca de 34% de umidade na massa total do resíduo. Já a lama estudada por Rodrigues *et al.* [2] apresentou teor de umidade ainda mais baixo, aproximadamente 25%.

A lama de carbonato de cálcio já sai do processo como um resíduo de partículas finas, cujo diâmetro médio é de 10  $\mu\text{m}$  e 17,25  $\mu\text{m}$  nas amostras estudadas por Modolo *et al.* [1] e Rodrigues *et al.* [2], respectivamente. Aproximadamente 82% da lama de carbonato de cálcio estudada por Amaral [8] ficaram retidos entre as peneiras 0,002mm e 0,075mm, comprovando a finura característica do material.

A Tabela 1 apresenta a caracterização química realizada a partir de Fluorescência de Raios X (FRX) de diferentes amostras, expressos pelos óxidos mais estáveis. A composição majoritária é de cálcio (expresso como  $\text{CaO}$ ). Em quantidade menor há a presença de óxidos alcalinos e alcalinos terrosos, como o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e vários outros elementos em quantidade traço. A existência ou não dos compostos em menor quantidade variam em função da matéria-prima utilizada para a produção da polpa de celulose

e dos diferentes processos que podem ser utilizados que são característicos de cada planta de produção [4].

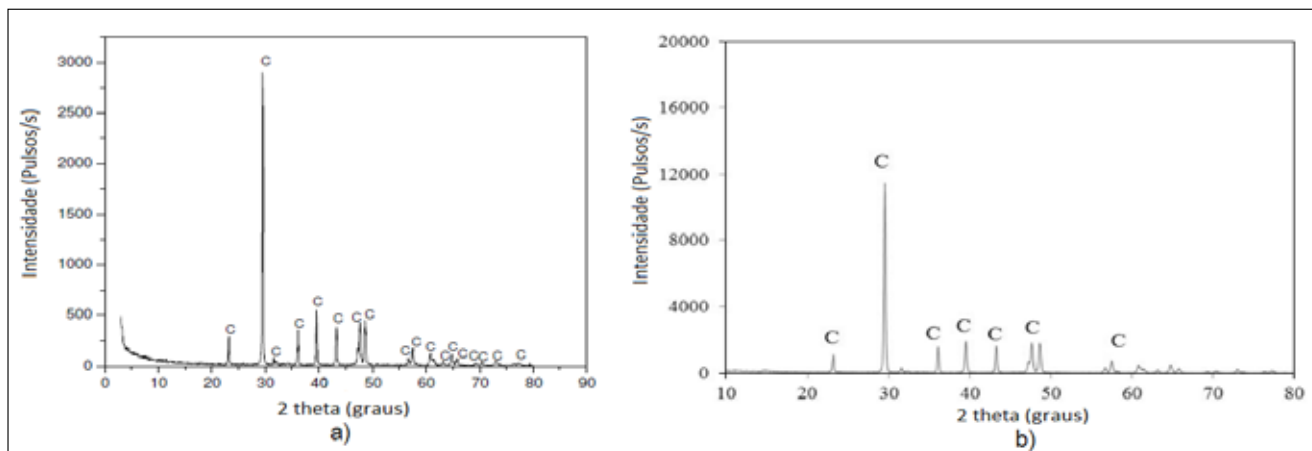
A elevada perda ao fogo apresentada na caracterização química, entre 37% a 41%, pode ser associada aos constituintes voláteis e à presença de materiais carbonáticos no resíduo.

Há grande semelhança entre os difratogramas das amostras estão apresentados na Figura 2a e 2b, apesar de serem de origem distintas. Nos dois casos, há fases cristalinas presentes nas amostras do resíduo que evidenciam a existência de picos cristalinos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).

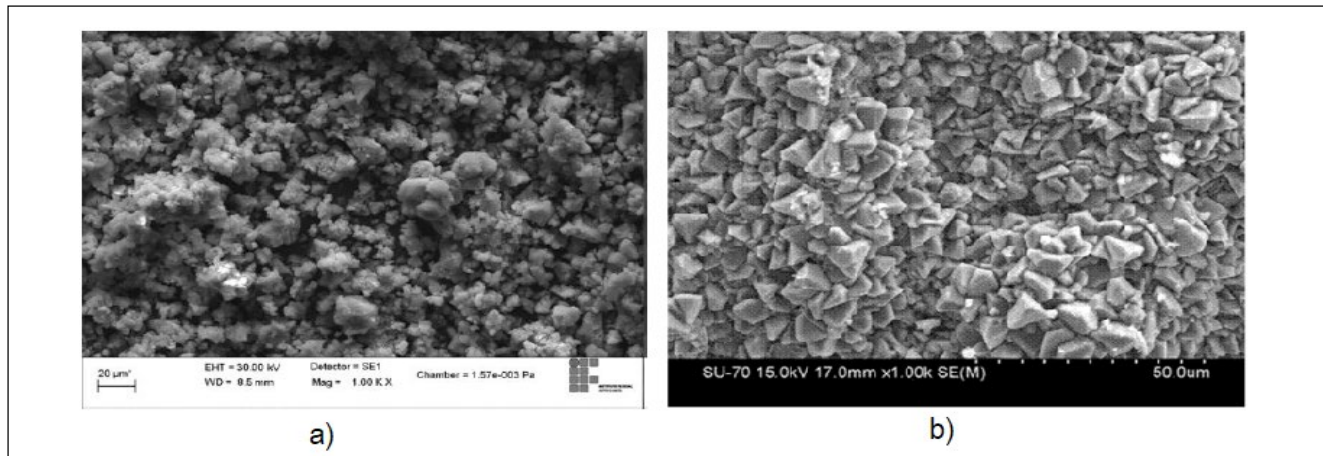
**Tabela 1 – Caracterização química de diferentes fontes de lama de carbonato de cálcio.**

	Wolff [5]	Rodrigues [2]	Modolo [1]	Qin [23]
CaO	55,8	53,1	51,8	45,79
SiO <sub>2</sub>	0,98	1,68	0,29	7,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	0,25	0,2	0,94
MgO	0,55	0,88	0,48	3,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18	0,14	0,03	0,47
Na <sub>2</sub> O	0,37	1,7	1,9	-
N <sub>2</sub> O	-	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,05	<0,05	-	-
K <sub>2</sub> O	0,03	0,08	0,1	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	<0,1	-	-
MnO	0,01	<0,05	-	-
C	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,82	0,9	-
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-	-	0,05	-
BaO	-	<0,1	-	-
PbO	-	<0,1	-	-
ZnO	-	<0,1	-	-
Cl <sup>-</sup>	-	-	0,08	-
SrO	-	0,2	-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	-	-
ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub>	-	<0,1	-	-
LOI	41,05	10,1	-	37,16

Fonte: Adaptado de Wolff [5], Modolo *et al.* [1], Qin [23] e Rodrigues [2]



**Figura 2 – Resultados da análise mineralógica por difração de raios-X de amostras de lama de carbonato de cálcio**  
Fonte: Wolff (2008) e Modolo *et al.* (2014)



**Figura 3 – Morfologia das partículas de lama de cal por microscopia eletrônica de varredura**  
**Fonte: Rodrigues et al. (2016) e Modolo et al. (2014)**

Martins *et al.* [4] realizaram uma análise termogravimétrica no intuito de verificar como os carbonatos estão combinados e quantificá-los. Identificou-se pequena perda de massa de água combinada oriunda da presença de gipsita ( $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e da perda de outros voláteis. Em contrapartida, houve grande perda de massa, em um pico exotérmico aos 800 °C, aproximadamente 39% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), devido à descarbonatação de calcita. A lama de carbonato de cálcio apresentou valor de pH de aproximadamente 12 [2].

A imagem ampliada da lama de carbonato de cálcio mostra a morfologia das partículas da lama de carbonato de cálcio. Na Figura 3a, as partículas são de superfície rugosa, possuem formato irregular e possuem diferentes diâmetros. Essas características podem ser atribuídas ao tipo de processo de formação, no caso por precipitação. Na Figura 3b, o resíduo apresenta regularidade maior e partículas romboédricas, formação típica dos cristais de calcita (Figura 3). Nas imagens, também foi possível perceber aglomeração das partículas, que pode ser atribuída à granulometria fina e à umidade presente na lama.

Carvalho [9] e Silva Júnior [10], objetivando a avaliação ambiental da lama de carbonato de cálcio, verificaram o extrato lixiviado e solubilizado, por meio dos procedimentos da NBR 10005 [11] e NBR 10006 [12], respectivamente. Nos dois casos, a lama de carbonato de cálcio foi classificada como Resíduo Classe II-A, ou seja, materiais não perigosos e não inertes, conforme NBR 10004 [13].

### AVALIAÇÃO DE APLICAÇÕES DA LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO EM DIFERENTES SETORES

São muitas as vantagens que a reciclagem desse resíduo pode trazer, como evitar a poluição ocasionada pela disposi-

ção incorreta e a minimização de resíduos gerados, diminuir a quantidade de matéria-prima utilizada para a produção de novos produtos e redução de custos [14]. Por isso, diversas aplicações para a lama de carbonato de cálcio já foram estudadas e propostas na literatura, que serão brevemente discutidas neste capítulo.

#### 1. Neutralizador de solo

A utilização de lama de carbonato de cálcio possibilita a correção do pH do solo por meio do aumento do pH de solos ácidos. Como a lama de carbonato de cálcio possui partículas finas, ela possui a vantagem de reagir com o solo rapidamente, por isso, carece de cuidado em relação à quantidade a ser utilizada no processo de recuperação.

O método de aplicação utilizado é o espalhador agrícola [15]. A lama de carbonato de cálcio apresenta potencial para a melhora da fertilidade do solo, mediante a liberação de potássio, cálcio e magnésio [17].

Estudos de Bognola, Maia e Andrade [3] comprovaram a viabilidade técnica do uso desse material para corretivo de acidez de solos, classificado como corretivo calcítico. Ao observar o processo de “calagem”, percebeu-se que é necessário apenas 4,2% (um dia de incubação) e 10% (28 dias de incubação) a mais de lama de carbonato de cálcio quando comparado ao  $\text{CaCO}_3$  (p.a.). Os resultados após 56 dias de incubação foram ainda melhores, de modo que foram necessários 16,34% menos lama de carbonato de cálcio que  $\text{CaCO}_3$ .

O estudo de Paim [18] mostrou que, em um latossolo vermelho distrófico típico de textura muito argilosa, o plantio com mudas de *Pinus taeda* L, espaçadas em 2,5 m, a utilização de lama de cal melhorou as características do solo, reduzindo os níveis de alumínio e a relação C/N, e aumentou o pH, capacidade de troca de cátion e teores de cálcio. Em

um período de oito anos, a aplicação em uma razão de 8t por hectare proporcionou um ganho de 14% do volume total por hectare, quando comparado com o tratamento testemunha, apresentando aumento significativo no diâmetro à altura do peito e altura.

Em função destes benefícios, a lama de carbonato de cálcio é considerada uma substituição técnica viável e, por isso, é utilizada em vários países como Canadá, Reino Unido etc. [16]. A utilização de lama de carbonato de cálcio nos Estados Unidos é aprovada e licenciada pelo *Maine Department of Environmental Protection*, permitindo a venda para a utilização na agricultura. Para ser aprovada, o departamento considerou os benefícios ao cultivo e ao solo, bem como a proteção ao meio ambiente e à saúde [15].

A utilização de lama de carbonato de cálcio como neutralizador de solo já é regularizada no Brasil, com venda autorizada pelo ministério da agricultura, com a denominação de lama de cal. Tal composto pode ser encontrado para venda direta ao consumidor final, de modo que o uso para essa finalidade já foi consolidado.

## 2. Blocos e outras peças cerâmicas

Na indústria cerâmica, é comum haver misturas de outras matérias-primas não plásticas para obter melhoria de certas propriedades do produto final. A adição de carbonato de cálcio proporciona razoável redução na temperatura de sinterização na fabricação de peças cerâmicas, pois diminui a temperatura de formação da fase vítrea que é responsável pela fusão do componente plástico. Além disso, também pode participar na reação de formação de silicato e sílico-aluminato cristalino que assegura a resistência mecânica e coesão do produto [19]. Eis que surgem estudos que avaliam a viabilidade de utilizar a lama de carbonato de cálcio como fonte alternativa às fontes naturais de carbonatos.

Estudos de Izidio, Subtil e Andrade [20] verificaram as características de cerâmica vermelha utilizando *dregrs* (5 e 10%) e lama de carbonato de cálcio (5 e 10%) adicionados à argila. Todas as amostras analisadas ficaram dentro das especificações da ABNT em perda ao fogo (<10 %), retração linear (<6 %), absorção de água (<20 %), tensão de ruptura (>20 kgf.cm<sup>-2</sup>) e densidade aparente (>1,6 g.cm<sup>-3</sup>).

A introdução da lama de carbonato de cálcio proporciona diminuição da retração e maior estabilidade dimensional das peças cerâmicas após o processo de sinterização. Essa propriedade garante menor probabilidade de defeito dimensional. Outra propriedade interessante nas placas produzidas com o resíduo é um aumento na absorção de

água, contrariando os resultados de Amaral [8]. Esse comportamento foi justificado pela diminuição da retração conferida pela adição de lama de carbonato de cálcio na peça cerâmica. Em relação à resistência e flexão de placas de cerâmica vermelha, em todas as misturas, contendo adição de lama de carbonato de cálcio, que variou de 0% a 16%, houve redução na resistência em relação às placas de referência, porém acima dos valores mínimos exigidos pela NBR 13818 [21,22].

Estudos de Qin [23] mostraram que cerâmicas de anortita podem ser sinterizadas à temperatura de 1.100 °C. As cerâmicas com substituição de lama de carbonato de cálcio tiveram menor peso e maior absorção de água, demonstrando que a reciclagem de lama de carbonato de cálcio para a produção de cerâmicas de anortita é viável.

Outra aplicação já estudada é em tijolo solo-cimento. Estudos de Amaral[8] verificaram que a substituição de até 10% de lama de carbonato de cálcio pelo cimento na composição da massa resultaram em tijolos com maior resistência do que os de referência. Porém, substituições acima de 10% levam à diminuição na resistência mecânica. O uso desses resíduos na composição de tijolo solo-cimento também trouxe melhorias em outras propriedades, como redução na absorção de água total. Apesar dos resultados obtidos, a lama de carbonato de cálcio nessa aplicação atua apenas como um filler, ou seja, como material inerte que preenche os vazios e não participa das reações de hidratação do cimento.

A possibilidade de melhora das propriedades físicas das argamassas como retratada acima, aliada a uma possibilidade de redução de custos, seria de grande valia para a construção civil. Cabe ainda ponderar sobre os efeitos do transporte para os custos de produção e para o meio ambiente, de modo que essa solução pode ser aplicada em determinada região.

## 3. Utilização como filler no cimento Portland, argamassas e concretos

A comunidade científica vem direcionando um grande esforço para melhorar a ecoeficiência do cimento Portland. Há um investimento forte em pesquisas sobre a substituição parcial do clínquer Portland por materiais de menor impacto ambiental na produção do cimento Portland, denominados como materiais cimentícios suplementares. Alguns autores estudaram a influência do uso da lama de carbonato de cálcio em substituição ao cimento Portland no desempenho mecânico e nas propriedades de argamassas e concretos.

Maheswaran et. al. [24] produziram clínquer a partir da sinterização entre a lama de carbonato de cálcio e nano-sílica. Os autores obtiveram a formação da belita ( $C_2S$ ), um dos principais compostos do clínquer Portland, na temperatura de 850 °C, valor abaixo do que a temperatura comumente utilizada para a produção do clínquer Portland que é de 1.450 °C.

Estudos de Modolo *et al.* [1] examinaram o comportamento da lama de carbonato de cálcio como filler em argamassas, verificando as propriedades reológicas e endurecidas das argamassas. As amostras foram preparadas com diferentes teores de lama de carbonato de cálcio: 10%, 20% e 30% em peso seco. Os resultados apresentaram:

- redução do espalhamento das argamassas ao aumento do teor de carbonato de cálcio;
- redução da capilaridade ao aumento do teor de carbonato de cálcio;
- resistência à compressão das argamassas sem diferenças significativas em relação à argamassa utilizada como referência.

Carvalho [9] estudou argamassas produzidas com 0%, 20%, 40%, 80% e 100% de adição de lama de carbonato de cálcio em relação à massa do cimento. A resistência à compressão e à tração por compressão diametral das argamassas atingiram resistência maior em relação à argamassa de referência. Além disso, argamassas com adição de lama de carbonato de cálcio apresentaram menor absorção de água, propriedade importante para a durabilidade.

Kumar et. al. [25] avaliaram o desempenho mecânico de argamassas produzidas com lama de carbonato de cálcio combinada com cinza volante. Argamassas produzidas com 12,5% de lama e carbonato de cálcio e 12,5% de cinza volante em substituição ao cimento Portland produziram argamassas com resistência à compressão adequada, 25 KPa. Porém, substituições de lama de carbonato de cálcio e cinza volante com teores acima de 12,5% levaram a argamassas com desempenho mecânico menor.

Maheswaran et. al [26] produziram concretos com substituições parciais de cimento Portland por lama de carbonato de cálcio nos teores de 10%, 20% e 30%, comparando seu desempenho com o concreto produzido com cimento Portland convencional. O desempenho mecânico do concreto produzido com 10% de lama de carbonato de cálcio equivale ao concreto de referência, mas teores acima de 10% levaram à diminuição da resistência mecânica. Os autores afirmam que a lama de carbonato de cálcio atuam como filler na matriz cimentícia.

Shermale e Varma [27] e Kumar et. al. [28]. avaliaram a substituição parcial de agregado fino pela lama de carbonato de cálcio na produção de concreto. Substituições entre 20% e 25% dos agregados finos pela lama levaram ao desempenho mecânico semelhante ao concreto referência.

A utilização de lama de carbonato de cálcio na produção de cimentos, argamassas e concretos apresenta potencial a ser melhor explorado. Principalmente na utilização como material filler na produção de cimentos de baixo impacto ambiental, tema que vem sendo alvo de muita pesquisa nos últimos anos.

#### 4. Tratamento de efluentes

Na área de tratamento de efluentes, a lama de Carbonato de Cálcio apresenta potencial utilização em reatores anaeróbios.

A instabilidade dos reatores anaeróbios é uma de suas maiores desvantagens em relação aos aeróbios e deve ser considerada quando a decisão por esse tipo de tratamento é adotada [29]. O uso de lama de carbonato de cálcio no processo de digestão anaeróbia para o tratamento de efluentes tem se mostrado eficaz para melhorar a estabilidade dos reatores e aumentar produção de metano [30].

Estudos de Zhang *et al.* [31] apresentaram aumento de até 3,01 vezes na redução de sólidos voláteis e produção 1,77 vezes mais alta de biometano por grama de sólidos voláteis, utilizando a concentração de 2,5g.L<sup>-1</sup> de lama de carbonato de cálcio. Esta tem grande potencial como adsorvente para a remoção de fosfatos e elementos metálicos como Mg, Fe, Al, entre outros [30].

Estudos de Zhang et al. [30] utilizaram lama de carbonato de cálcio para evitar o acúmulo de ácidos graxos voláteis (favorecidos pelo pH ácido) e suprir a deficiência de elementos inorgânicos. Quando a taxa de lama de carbonato de cálcio ficou entre 6 e 10g.L<sup>-1</sup>, a digestão anaeróbia se manteve eficiente e estável, embora concentrações mais altas que essa tenham inibido a produção de metano.

Estudos de Zhang, Wang e Jiang [31] verificaram que em uma produção fermentativa de hidrogênio de restos de alimentos, uma adição de 1 a 4 gramas de lama de carbonato de cálcio a cada 200 gramas de comida melhorou significativamente o desempenho da fermentação, acelerando a reação e aumentando a produção de H<sub>2</sub>.

A utilização de carbonato de cálcio pode trazer viabilidade de operação para reatores instáveis e com deficiência de elementos inorgânicos, embora o excesso desse composto possa trazer condições adversas para o reator.

### 5. Estabilização de solo para base e sub-base de pavimentação

Eroğlu *et al.* [32] estudaram teores de substituição de 0%, 5%, 10% e 15% de lama de carbonato de cálcio em três tipos de solos e verificaram a modificação nas propriedades físicas e mecânicas. A adição de lama de carbonato de cálcio melhorou a resistência ao cisalhamento de todos os solos estudados. Houve ainda um aumento no Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), com o aumento do teor de substituição de solo pelo resíduo. Enquanto a densidade seca diminuiu, o teor ótimo de água aumenta em função do aumento do teor de substituição. Isso pode ser atribuído ao aumento da quantidade de finos. Quando a densidade seca do material diminuiu, menor será a compressibilidade do solo, o que pode levar a uma deformação em função do carregamento excessivo.

Silva Júnior [10] desenvolveu um estudo muito parecido, porém em misturas com estabilização solo-cal para base e sub-base de pavimentos, que substitui solo por resíduo. A substituição somente de lama de carbonato de cálcio por solo reduziu a resistência (solo-resíduo), mas quando há estabilização dessa mistura com cal (solo-resíduo-cal), ganha-se em resistência. Sendo assim, misturas solo-cal-resíduo apresentaram resistências superiores aos solos naturais.

### CONCLUSÕES

A produção científica sobre esse assunto utiliza algumas vezes a nomenclatura industrial lama de cal e outras, de acordo com a sua composição química, lama de carbonato

de cálcio. Qualquer revisão sobre o assunto deve considerar ambas as nomenclaturas.

Embora o uso de lama de carbonato de cálcio esteja sendo estudado em diversas aplicações e em diversos países, o uso como corretivo de solo destaca-se entre os demais porque já está regulamentado e consagrado. A utilização do resíduo apresenta outras vantagens, além da correção do pH, pois agrega ao solo outros nutrientes necessários para a sua fertilidade.

A aplicação nas demais indústrias encontra-se ainda em fase laboratorial, apesar de demonstrar vantagens comparativas em diversas características. A aplicação na área de cerâmica, por exemplo, apresentou resultados de melhoria quanto ao desempenho mecânico e também diminuição da retração das peças cerâmicas, podendo se tornar uma variação para condições específicas em que essas características são necessárias. A aplicação da lama de carbonato de cálcio na produção de cimento e argamassas é bastante limitada, apesar de os estudos apresentados aqui terem mostrado resultados positivos quando substituído em baixos teores.

O uso da lama de carbonato de cálcio no tratamento de efluentes está de certa forma centralizado nos estudos do grupo de pesquisa do Dr. Jishi Zhang que tem obtido resultados relevantes na melhora da estabilidade e produção de metano em reatores anaeróbios. Tal adição pode se apresentar como uma alternativa viável para contornar a instabilidade de reatores anaeróbios em condições adversas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, pelo financiamento da pesquisa e concessão das bolsas. ■

### REFERÊNCIAS

- AMARAL, M. C. **Avaliação dos efeitos de incorporação de resíduos de lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento.** Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10005:2004.** Lixiviação de resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10006:2004.** Solubilização de resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004:2004.** Resíduos Sólidos. Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13818:1997.** Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Classificação. Rio de Janeiro, 1997.
- BOGNOLA, A.; MAIA, C. M. B. F.; ANDRADE, G. C. **Avaliação da lama de cal como material corretivo de solo.** WORKSHOP SUL-AMERICANO SOBRE USOS ALTERNATIVOS DE RESÍDUOS DE ORIGEM FLORESTAL E URBANA, 1997, Curitiba. Anais. Colombo, Embrapa Florestas, 1997. p.125-128.
- CARVALHO, A. L. **Avaliação das Propriedades mecânicas da argamassa contendo adição de resíduo de Carbonato de Cálcio gerado na fabricação de celulose.** Dissertação de Mestrado. UFB, Salvador, 2006.

- EROĞLU, H. *et al.* **Soil stabilization of forest roads sub-base using lime mud waste from the chemical recovery process in alkaline pulp mill.** Journal of Applied Science, v. 9, p. 1199-1203, 2006.
- GASKI, J. **Land application of pulp mill lime mud.** University of Georgia, College of Agriculture and Environmental Sciences, Cooperative Extension Service along with the Pollution Prevention Assistance Division. Bulletin 1249, Georgia, USA, 2004.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ (2017). **Relatório Anual.** 80 p. Disponível em: [https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf). Acesso em: 14 jul.19.
- IZIDIO, L. L.; SUBTIL, G. W.; ANDRADE, A. A. **Utilização de resíduos sólidos da industria papeleira como materia prima para fabricação de tijolos.** Periódico Eletrônico - Forum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 1, p. 200-209, 2013.
- KUMAR, V.; SONI, Y.; KULKARNI, S.; SHARMA, P.; SINGH, S.K. **Lime sludge: an emerging alternate construction building material for the partial replacement of fine aggregate.** AIChE Annual Meeting: Proceedings International Congress on Energy, Biomass Conversion. Processing of Solids. Salt Lake City, USA, 2015.
- KUMAR, K. A.; RAJASEKHAR, K.; SASHIDHAR, C. **Experimental investigation on fly ash and lime sludge in cement mortar.** International Journal of Latest Technology in Engineering Management Applied Science (IJLTEMAS). V. 5, I. 2, p. 2278-2540. 2016.
- MAHESWARAN, S.; KALAISELVAM, S.; ARUNBALAJI, S.; PALANI, G.S.; IYER, N. R. **Sb-Belite cements (b-dicalcium silicate) obtained from calcined lime sludge and silica fume.** Cement and Concrete Composites. V. 66, p. 57-65. 2015.
- MAHESWARAN, S.; KUMAR, V. R. BHUVANESHWARI, B.; PALANI, G. S.; IYER, N. R. **Studies on lime sludge for partial replacement of cement.** Applied Mechanics and Materials. V. 71-78, p. 1015-1019. 2011.
- MARTINS, F. M. *et al.* **Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a Kraft pulp and paper mill.** Journal of Hazardous Materials, v. 147, p. 610-617, 2007.
- MODOLO, R. C. E. Notas. 2017.
- MODOLO, R. C. E. *et al.* **Lime mud from cellulose industry as raw material in cement mortars.** Materiales de Construcción, v. 64, p. 316, 2014.
- MONTE, M. C.; FUENTE, E.; BLANCO, A. NEGRO, C. **Waste management from pulp and paper production in the European Union.** Waste Management, v. 29, p. 293-308, 2009.
- NEVES, E. M. **Desenvolvimento de composição cerâmica para massas de monoporosa com o uso de resíduo da indústria de papel como fonte de Carbonatos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.
- PAIM, R. M. **Efeito do uso de lama de al e cloreto de potássio no solo, estado nutricional e crescimento do *Pinus taeda* L. sobre latossolo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- QUINO, S.; CHERNICHARO, C. **Reators under stress conditions: causes and control strategies.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.
- QIN, J.; CUIN, C.; HUSSAIN, A.; CUI, X. **Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering tem.** Ceramics international, 2014.
- RODRIGUES, L. R. *et al.* **Caracterização de resíduos sólidos da indústria de celulose tipo Kraft visando sua aplicação no desenvolvimento de materiais cerâmicos.** Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2016.
- SHERMALE, Y.; VARMA, M. **Effective use of paper sludge (hypo sludge) in concrete.** International Journal for Scientific Research and Development (IJSRD). V. 3, I. 8, p. 287-290. 2015.
- SILVA JÚNIOR, W. S. **Estudo para a utilização de resíduo da fabricação de papel na construção rodoviária.** Dissertação de Mestrado. USP, 2010.
- USDA. **Lime Mud Crops.** 2004.
- WOLFF, E. **O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha.** Tese de Doutorado. UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- ZHANG, J. *et al.* **Synergistic effects of anaerobic digestion from sewage sludge with lime mud.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, p. 12022-12031, 2017.
- ZHANG, J.; WANG, Q.; JIANG, J. **Lime mud from paper-making process addition to food waste synergistically enhances hydrogen fermentation performance.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 38, n. 6, p. 2738-2745, 27 fev. 2013.
- ZHANG, J. *et al.* **Anaerobic digestion of food waste stabilized by lime mud from papermaking process.** BIORESOURCE TECHNOLOGY, v. 170, p. 270-277, 2014.