

## DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE LAMA DE CAL DA INDÚSTRIA DE CELULOSE\*

Romário Silva Souza<sup>1</sup>  
Almir Silva Neto<sup>2</sup>  
André Maurício de Oliveira<sup>3</sup>  
Erriston Campos Amara<sup>4</sup>  
Evandro Tolentino<sup>5</sup>

### Resumo

Como a produção da lama de cal, gerada no processo kraft da indústria de celulose, é significativamente grande, torna-se interessante a verificação da possibilidade da sua utilização na construção civil. Esta pesquisa teve como objetivo definir quantidades e parâmetros para a produção de argamassas produzidas com a incorporação de lama de cal. Através de um planejamento fatorial foram definidas três variáveis, sendo elas: o tipo de cal, a quantidade de água e a quantidade de lama de cal. A resposta analisada foi a resistência de compressão. O resultado mostrou o melhor desempenho foi obtido para as argamassas fabricadas com a substituição 25% da lama de cal sem tratamento, combinada com a quantidade de água para o fator água/aglomerante de 0,78.

**Palavras-chave:** Resíduo; Lama de cal, Argamassa; Cal Hidratada.

### PERFORMANCE OF MORTARS PRODUCED WITH LIME MUD FROM CELLULOSE INDUSTRY

#### Abstract

As the amount of lime mud waste generated by the kraft process from cellulose industry is significantly large, it is worth verifying the possibility to use lime mud in civil construction. The objective of this research was to define parameters to produce mortar with lime mud as raw material. A factor analysis was applied to allow the interpretation of quantitative compression strength data. Through a factorial design, three variables were defined: the type of lime, the amount of water and the amount of lime mud. The results showed that mortars with 25% wt. lime mud addition and water/cementitious ratio of 0.78 had the best performance.

**Keywords:** Residue; Lime mud, Mortar; Hydrated Lime.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, Bacharel, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica, Professor, Departamento de Metalurgia e Química-DMQTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Químico, Doutor em Química, Professor, Departamento de Metalurgia e Química-DMQTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil

<sup>4</sup> Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência dos Materiais, Professor, Departamento de Metalurgia e Química-DMQTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil.

<sup>5</sup> *Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Professor, Departamento de Computação e Construção Civil-DCCTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade ambiental e social na gestão dos resíduos sólidos é construída por meio de modelos e sistemas integrados, que possibilitam a redução dos resíduos gerados pela população, com a implantação de programas que permitam também a reutilização desses materiais e, por fim, a sua reciclagem, para que possam servir de matéria-prima para a indústria, diminuindo o desperdício e gerando renda [1]. Segundo a Iba [2], no ano de 2017 houve um avanço nas negociações com o mercado externo em todos os segmentos da indústria de celulose. Além disso, as exportações aumentaram de 2,3% se comparado ao ano anterior e a produção no setor avançou em 3,8%, sendo que a produção total do ano de 2017 foi de 19,5 milhões de toneladas, 1,4% mais alta em comparação com o ano de 2016.

Na construção civil as argamassas são utilizadas para assentamento e revestimento de alvenarias, assentamento de pisos, assentamento de revestimentos diversos, etc. As argamassas que utilizam cal e cimento Portland como aglomerantes podem ser destinadas à execução de emboço e reboco, por apresentarem boa plasticidade e condições favoráveis de endurecimento, quando no estado fresco, além de maior deformabilidade, quando no estado endurecido. Elas também proporcionam um excelente acabamento, podendo também ser utilizadas no assentamento de alvenaria de vedação. Já as argamassas que têm o cimento Portland como único aglomerante apresentam uma maior resistência mecânica, quando no estado endurecido, porém são de difícil trabalhabilidade, quando no estado fresco [3].

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland [4], na construção civil a cal é utilizada principalmente na forma hidratada, como componente fundamental no preparo de argamassas de assentamento e de revestimento de grande durabilidade e ótimo desempenho. A cal hidratada oferece sobre a cal virgem algumas vantagens, dentre elas a maior facilidade de manuseio, transporte e armazenamento. É um produto pronto para ser utilizado, eliminando as operações de extinção e envelhecimento no canteiro de obra. Sendo um produto seco e pulverulento, a cal hidratada oferece uma maior facilidade de mistura na elaboração das argamassas, se comparada à pasta de cal resultante da cal extinção da virgem [5].

A lama de cal é um resíduo gerado através de um procedimento utilizado no processamento de celulose, denominado “processo kraft”. Segundo Isenmann [6] este processo é utilizado para se produzir cerca de 80% da celulose do mundo e possui algumas desvantagens, tais como a alta poluição odorífica e o alto custo de tratamento do mesmo. Maeda, Costa e Silva [7] definiram a lama de cal como um resíduo sólido de coloração cinza claro, homogêneo e sem odor característico, gerado no processo de clarificação do licor verde, no qual é processada para a recuperação da cal. O processo de caustificação possui dois objetivos básicos e de essencial importância, que consistem na produção do licor branco, para o cozimento dentro das especificações requeridas para o processo, e a lavagem da lama de cal gerada durante o processo de caustificação, para propiciar a sua requeima em um forno de cal. A lama de cal é gerada após a fase do processo em que o licor verde é transformado em licor branco, pois o carbonato de sódio presente no licor verde é inativo no processo de cozimento, sendo então necessária a adição de cal virgem, para convertê-lo em hidróxido de sódio. Após o processo o licor é filtrado e lavado, sendo conhecido agora como licor branco fraco. Então, a lama de cal lavada é bombeada ao misturador de lama e, posteriormente, a um filtro a vácuo, para sua lavagem final, desaguamento e alimentação do forno de cal. No entanto nem toda lama de cal é possível ser recuperada, sendo que uma parcela de aproximadamente

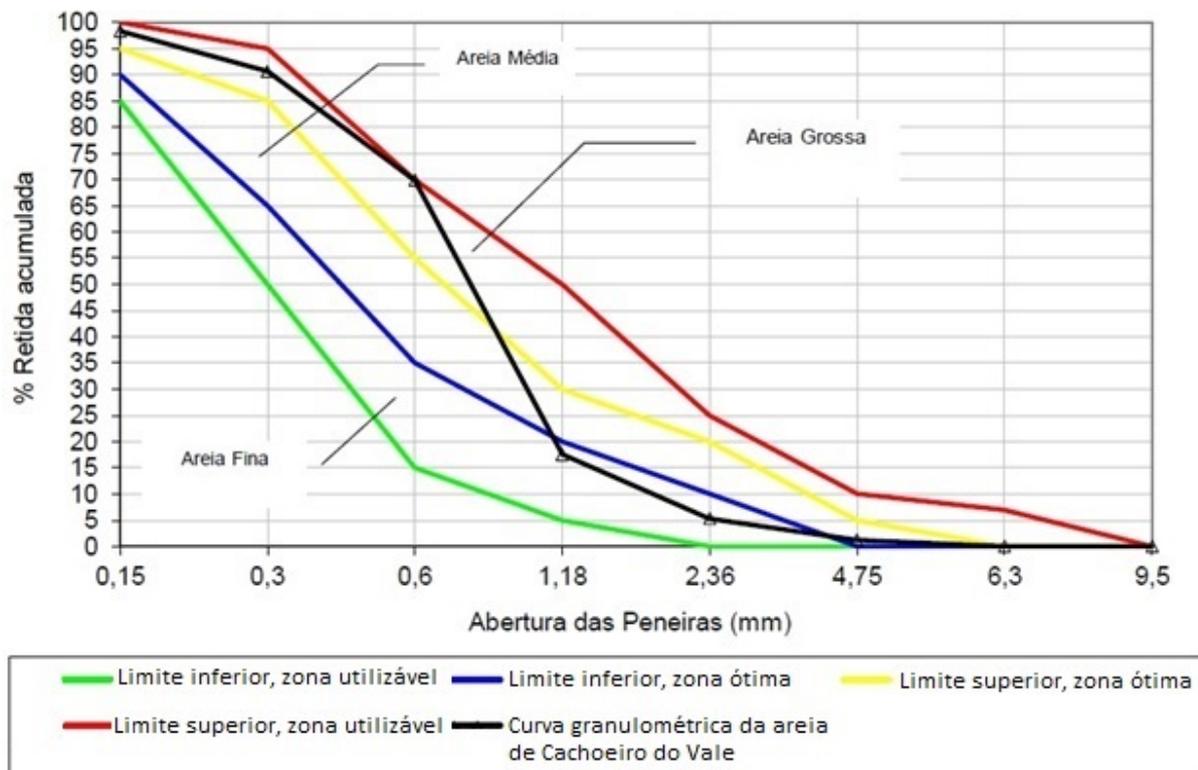
5% é transformada em resíduo sólido. A calcinação é o processo de conversão da lama de cal em cal requeimada. Esta reação processa-se em elevadas temperaturas, acima de 800°C, no interior de fornos rotativos, que funcionam como reatores e como dispositivos para transferência de calor. O processo compreende a filtragem da lama de cal, devidamente lavada, com o objetivo de se atingir elevados teores de sólidos, geralmente acima de 70%. A lama de cal filtrada é então encaminhada ao forno de cal com o objetivo de ser calcinada, dando origem novamente à cal, CaO. A cal produzida possui impurezas e material não calcinado, que podem chegar em até 12% da massa total, dando origem ao conceito de cal útil, que é o produto total da calcinação menos a carga de inertes. A conversão da lama de cal em cal requeimada é um importante passo para a produção do licor branco de cozimento no processo Krafte normalmente fornece mais de 95% das necessidades de cal da fábrica [6].

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados de uma pesquisa que visou definir as quantidades e parâmetros de ensaio para a produção de uma argamassa produzida com a incorporação do resíduo lama de cal, da indústria de celulose.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O agregado miúdo utilizado na confecção da argamassa é proveniente de Cachoeira do Vale, distrito do município de Timóteo, MG, e foi coletado de acordo com a NBR NM 26 [8]. A umidade do agregado foi determinada por secagem em estufa a 105±5°C por 24 h, sendo obtido o valor de 1,9 %.

Após a retirada da estufa, foram separadas três amostras de areia, na quantidade de 500g cada. Cada uma das amostras foi disposta no topo de um conjunto de peneiras de série normal e intermediária, segundo a NBR NM 248 [9], realizando-se a agitação mecanizada do conjunto por 5 minutos, com o objetivo de classificar e separar os grãos da amostra. A Figura 1 apresenta a distribuição granulométrica obtida para o agregado miúdo.



**Figura 1.** Distribuição granulométrica do agregado miúdo

Após o ensaio granulométrico foi calculado o módulo de finura da areia, segundo orientação da NBR 7211 [10], através da soma das porcentagens retidas acumuladas da areia nas peneiras de série normal, menos o fundo, dividida por 100. Considerando os valores obtidos nos ensaios granulométricos da areia natural, o módulo de finura calculado igual a 2,83, sendo a areia classificada como estando na zona ótima. Para a determinação da massa específica da areia, 200 ml de água foram colocadas inicialmente no Frasco Chapman e, logo após, foram adicionadas 500 g do agregado miúdo seco em estufa. A massa específica obtida foi 2.793,30 kg/m<sup>3</sup>. Em seguida foi feita uma redução granulométrica de todo material utilizando em uma peneira de 2,36 mm, sendo realizado o peneiramento manual do mesmo. Para se definir as quantidades de água a serem utilizadas nos traços, foram feitos ensaios de determinação do índice de consistência normal segundo a NBR 7215 [11], conforme mostra a Figura 2. Para viabilizar uma análise estatística consistente, foram definidas, por tentativa e erro, duas quantidades de água para serem adicionadas às argamassas, tornando-as “argamassas plásticas” (conforme o índice de consistência). Para a quantidade da água A1 (702 g), que produziu um fator de água/aglomerante de 0,78, o índice de consistência obtido foi de 260 mm. Para a quantidade da água A2 (765 g), que produziu um fator de água/aglomerante de 0,85, o índice de consistência obtido foi de 290 mm.



**Figura 2.** Ensaio de determinação do índice de consistência normal da argamassa.

O cimento Portland utilizado foi CP IV-32 RS, resistente a sulfatos e com baixo calor de hidratação. A sua elevada resistência a sulfatos o torna mais indicado para utilização em obras que serão executadas em ambientes agressivos tais como esgotos, fundações e água do mar. A escolha do tipo de cimento deveu-se a sua grande disponibilidade na Região do Vale do Aço em Minas Gerais. A cal hidratada industrializada utilizada foi a CH-III, comum com carbonatos.

A lama de cal utilizada na confecção da argamassa foi fornecida pela empresa CENIBRA – Celulose Nipo-Brasileira S.A, localizada no município de Belo Oriente, MG. O material coletado por estar saturado foi colocado por 24 horas em uma estufa com temperaturas de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . A umidade determinada por secagem em estufa foi 26,14 %. A lama de cal foi submetida a um ensaio de determinação de módulo de finura. Para este ensaio, uma amostra 100 g seca em estufa foi colocada numa peneira 0,600 mm (nº 30), posicionada sobre uma peneira 0,075 mm (nº 200), sendo lavada em seguida através da primeira peneira, utilizando jatos de água a partir de um tubo flexível, por aproximadamente 10 minutos. O resultado obtido de F30 foi de 1,2% e de F200 foi de 0,5%. Devido a umidade presente na lama de cal, após secagem ela apresentava uma granulometria irregular, sendo necessário fazer o desmanchando dos torrões, utilizando um almofariz e uma mão de gral (recoberta de borracha), com capacidade de 5 kg de solo, tendo o cuidado para não ocorrer a descaracterização das partículas da cal.

Segundo Sabbatini *apud* Forti [3] a cal passa por três processos a partir do seu estado natural, que são a calcinação, a hidratação e a extinção. A calcinação é o processo da queima da pedra calcária, onde as temperaturas variam entre 900 e  $1200^\circ\text{C}$ . Após este processo é obtida a cal virgem ou cal viva. O processo de hidratação consiste em adicionar água à cal virgem, para formar a cal hidratada. No tratamento da lama de cal foi seguido os três processos citados acima, iniciando-se com a queima da lama de cal, que é um carbonado de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), com o objetivo de transformar a mesma em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e posteriormente em hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . O tratamento térmico foi realizado no Laboratório de Metalurgia do CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, utilizando um forno do tipo mufla. O material foi aquecido até  $1000^\circ$ , permanecendo nesta temperatura por 6 horas (“tempo de encharque”). O tempo de encharque teve o propósito de garantir que todo o material presente no cadinho atingisse a temperatura pré-definida. Após o tratamento térmico, tendo a amostra resfriado até a temperatura ambiente, foi realizada a sua hidratação. Para tal ela foi colocada em uma bandeja de metal e espalhada uniformemente, sendo adicionado a água em seguida.

O traço (composição) adotado para as argamassas foi de 1:2:8, que, segundo Guimarães [12], é o traço usualmente utilizado para a execução de reboco em áreas

externas acima do piso, assim como a aplicação *in loco*. O traço foi dosado de acordo com a proporção em volume. Foi definido que os traços seriam elaborados de acordo com um planejamento fatorial 2<sup>3</sup>, levando em consideração 3 variáveis e as combinações possíveis entre si, conforme mostrado nos Quadros 1 e 2.

**Quadro 1.** Variáveis do traço

| VARIÁVEIS                             | -     | +    |
|---------------------------------------|-------|------|
| TIPO DE CAL                           | RLCST | RLCT |
| QUANTIDADE DE ÁGUA                    | A1    | A2   |
| QUANT. DE SUBSTITUIÇÃO DE LAMA DE CAL | 25%   | 50%  |

*RLCST: Rejeito de lama de cal sem tratamento; RLCT: Rejeito de lama de cal com tratamento térmico e posterior hidratação.*

**Quadro 2.** Combinações de variáveis de cada traço

| TRAÇOS  | VARIÁVEIS |    |     |
|---------|-----------|----|-----|
|         | 1         | 2  | 3   |
| T25A1   | -         | -  | -   |
|         | SEM TRAT. | A1 | 25% |
| T25A2   | -         | +  | -   |
|         | SEM TRAT. | A2 | 25% |
| T50A1   | -         | -  | +   |
|         | SEM TRAT. | A1 | 50% |
| T50A2   | -         | +  | +   |
|         | SEM TRAT. | A2 | 50% |
| TCT25A1 | +         | -  | -   |
|         | HIDRATADA | A1 | 25% |
| TCT25A2 | +         | +  | -   |
|         | HIDRATADA | A2 | 25% |
| TCT50A1 | +         | -  | +   |
|         | HIDRATADA | A1 | 50% |
| TCT50A2 | +         | +  | +   |
|         | HIDRATADA | A2 | 50% |

*T25A1: Traço com substituição de 25% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal sem tratamento térmico, com a quantidade de água 1; T25A2: Traço com substituição de 25% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal sem tratamento térmico, com a quantidade de água 2; T50A1: Traço com substituição de 50% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal sem tratamento térmico, com a quantidade de água 1; T50A2: Traço com substituição de 50% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal sem tratamento térmico, com a quantidade de água 2; TCT25A1: Traço com substituição de 25% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal após tratamento térmico, com a quantidade de água 1; TCT25A2: Traço com substituição de 25% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal após tratamento térmico, com a quantidade de água 2; TCT50A1: Traço com substituição de 50% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal após tratamento térmico, com a quantidade de água 1; TCT50A2: Traço com substituição de 50% da Cal Hidratada III pela Lama de Cal após tratamento térmico, com a quantidade de água 2.*

A Tabela 1 a seguir apresenta o consumo efetivo de cada material em função do traço dosado.

Tabela 1. Relação do consumo efetivo dos materiais por traço dosado.

| Traços  | Consumo de Cimento (g) | Consumo de Areia (g) | Consumo de Cal Hidratada III (g) | Consumo de Lama de Cal (g) | Consumo de Lama de Cal Tratada (g) | Consumo de Água (g) | Fator água/aglomerante |
|---------|------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------|
| T25A1   | 300,00                 | 2.700,00             | 450,00                           | 150,00                     | -                                  | 702,00              | 0,78                   |
| T25A2   | 300,00                 | 2.700,00             | 450,00                           | 150,00                     | -                                  | 765,00              | 0,85                   |
| T50A1   | 300,00                 | 2.700,00             | 300,00                           | 300,00                     | -                                  | 702,00              | 0,78                   |
| T50A2   | 300,00                 | 2.700,00             | 300,00                           | 300,00                     | -                                  | 765,00              | 0,85                   |
| TCT25A1 | 300,00                 | 2.700,00             | 450,00                           | -                          | 150,00                             | 702,00              | 0,78                   |
| TCT25A2 | 300,00                 | 2.700,00             | 450,00                           | -                          | 150,00                             | 765,00              | 0,85                   |
| TCT50A1 | 300,00                 | 2.700,00             | 300,00                           | -                          | 300,00                             | 702,00              | 0,78                   |
| TCT50A2 | 300,00                 | 2.700,00             | 300,00                           | -                          | 300,00                             | 765,00              | 0,85                   |

A mistura da argamassa foi feita manualmente, devido à pequena quantidade de material a ser misturado, conforme mostra a Figura 7. Primeiramente, foi adicionado, nesta sequência, a areia, a cal e o cimento, sendo todo o material misturado até a sua completa homogeneização. Subsequentemente, a água foi adicionada e foi feita nova mistura, agora por um tempo de aproximadamente 5 minutos. A mistura da argamassa foi feita manualmente, devido à pequena quantidade de material a ser misturado, conforme mostra a Figura 3.



Figura 3. Preparação da argamassa.

Após a preparação da argamassa foi feita a moldagem dos corpos de prova, conforme a NBR 7215 [11], utilizando moldes metálicos nas dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo a argamassa adicionada em três camadas, recebendo 30 golpes em cada camada, com o soquete metálico para o adensamento (sem adentrar nas camadas inferiores). Após 24 h de moldagem, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados em uma câmara úmida preenchida com água, permanecendo assim até o dia da realização dos ensaios de compressão.

Os ensaios de compressão uniaxial dos corpos-de-prova foram executados utilizando uma máquina universal da marca Emic DL30000N, conforme mostra a

Figura 4. Os corpos de prova de cada traço dosado foram rompidos na idade de 28 dias. Durante o rompimento dos corpos de provas foi utilizado um prato com disco de Neoprene, como o objetivo de tornar plana a área de contato do corpo de prova com a prensa, para que o contato fosse mais efetivo.



Figura 4. Realização de ensaio de compressão axial em máquina universal Emic DL30000N.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de compressão uniaxial. Foram rompidos 4 corpos de prova para cada traço, na idade de 28 dias.

Tabela 2. Resultados de resistência à compressão uniaxial (MPa)

| Traços  | Nº Rep. | Respostas das repetições |      |      |      | Média | Desvio padrão | Intervalo de confiança para a média populacional |
|---------|---------|--------------------------|------|------|------|-------|---------------|--|
| T25A1   | 4       | 2,14                     | 2,32 | 2,41 | 2,53 | 2,35  | 0,16          | 2,06 <μ< 2,64                                    |
| T25A2   | 4       | 1,66                     | 1,85 | 1,43 | 1,67 | 1,65  | 0,17          | 1,34 <μ< 1,96                                    |
| T50A1   | 4       | 1,30                     | 1,37 | 1,52 | 1,22 | 1,35  | 0,13          | 1,11 <μ< 1,59                                    |
| T50A2   | 4       | 1,17                     | 1,27 | 1,02 | 1,24 | 1,17  | 0,11          | 0,97 <μ< 1,37                                    |
| TCT25A1 | 4       | 1,48                     | 1,27 | 1,28 | 1,28 | 1,33  | 0,10          | 1,15 <μ< 1,51                                    |
| TCT25A2 | 4       | 0,99                     | 1,08 | 1,06 | 1,16 | 1,08  | 0,07          | 0,95 <μ< 1,21                                    |
| TCT50A1 | 4       | 1,27                     | 1,20 | 1,22 | 1,20 | 1,22  | 0,03          | 1,16 <μ< 1,28                                    |
| TCT50A2 | 4       | 0,91                     | 1,06 | 0,87 | 0,98 | 0,95  | 0,08          | 0,80 <μ< 1,10                                    |

Através dos resultados obtidos percebe-se que a composição T25A1 apresentou o melhor desempenho, sendo observado que a mesma apresenta uma menor relação água/aglomerante e um menor índice de substituição da lama de cal sem tratamento térmico.

A Tabela 3 apresenta os efeitos do planejamento fatorial, analisando os mesmos de forma isolado é também correlacionado os mesmos.

Tabela 3. Tabela de efeitos do planejamento fatorial

|                    | Efeitos |   | Erros | t ( 24 ) | p      |
|--------------------|---------|---|-------|----------|--------|
| <b>Combinações</b> | 1,388   | ± | 0,021 | 67,416   | 7E-29  |
| <b>1</b>           | -0,349  | ± | 0,041 | 8,484    | 1E-08  |
| <b>2</b>           | -0,426  | ± | 0,041 | 10,345   | 3E-10  |
| <b>3</b>           | -0,488  | ± | 0,041 | 11,856   | 2E-11  |
| <b>12</b>          | 0,125   | ± | 0,041 | 3,047    | 0,0056 |
| <b>13</b>          | 0,091   | ± | 0,041 | 2,210    | 0,0369 |
| <b>23</b>          | 0,313   | ± | 0,041 | 7,609    | 8E-08  |
| <b>123</b>         | -0,133  | ± | 0,041 | 3,233    | 0,0035 |

Através dos resultados obtidos foi possível verificar que os itens tiveram uma variância das observações individuais de 1,35%; já a variância dos efeitos foi de 0,17%, com um erro final dos efeitos de 4,12%, abaixo do nível de significância que é de 5,00%. Analisando isoladamente a **variável 1** (lama de cal tratada termicamente ou não), a **variável 2** (quantidade de água) e a **variável 3** (quantidade de lama de cal), todas apresentaram efeito negativo. Dentre todas, a variável 3 isoladamente apresentou o maior efeito negativo. A combinação entre as **variáveis 1 e 2** apresentou num valor positivo de 0,125, com a utilização da lama de cal sem tratamento e a quantidade de água A1 (fator água/aglomerante de 0,78), mostrando que quando trabalhadas conjuntamente resultam em benefício para o traço. Outra combinação que resultou em valor positivo foi aquela entre as **variáveis 1 e 3**, que apresentou valor positivo de 0,091, com a utilização da lama de cal tratada termicamente e a quantidade de substituição de lama de cal de 25%. O melhor resultado obtido foi para a combinação entre as **variáveis 2 e 3**, que apresentou um valor positivo de 0,313, com a utilização da quantidade de água A1 (fator água/aglomerante de 0,78) e a quantidade de substituição de lama de cal de 25%. Entretanto, a combinação de todas **variáveis 1, 2 e 3** resultou num efeito negativo de 0,133, sendo a mistura da lama de cal sem tratamento térmico, quantidade de água A1 e substituição de lama de cal de 25%. Para a **variável 2** era esperado que com o aumento da quantidade de água, a resistência à compressão seria reduzida, devido à relação água/aglomerante, pois o aumento da água reduz a compacidade da pasta de cimento. Os valores obtidos através da combinação com a **variável 3** mostraram que o aumento da quantidade de substituição dos materiais interfere diretamente na resistência dos traços. A Figura 5 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos efeitos, sendo os pontos menores que 1,2 3 a análise das combinações isoladas, os maiores que 0,00 representa na ordem cresce do gráfico as variáveis (1,2), (1,3) e (2,3), sendo o ponto no eixo 0,00 as variáveis 1,2,3.

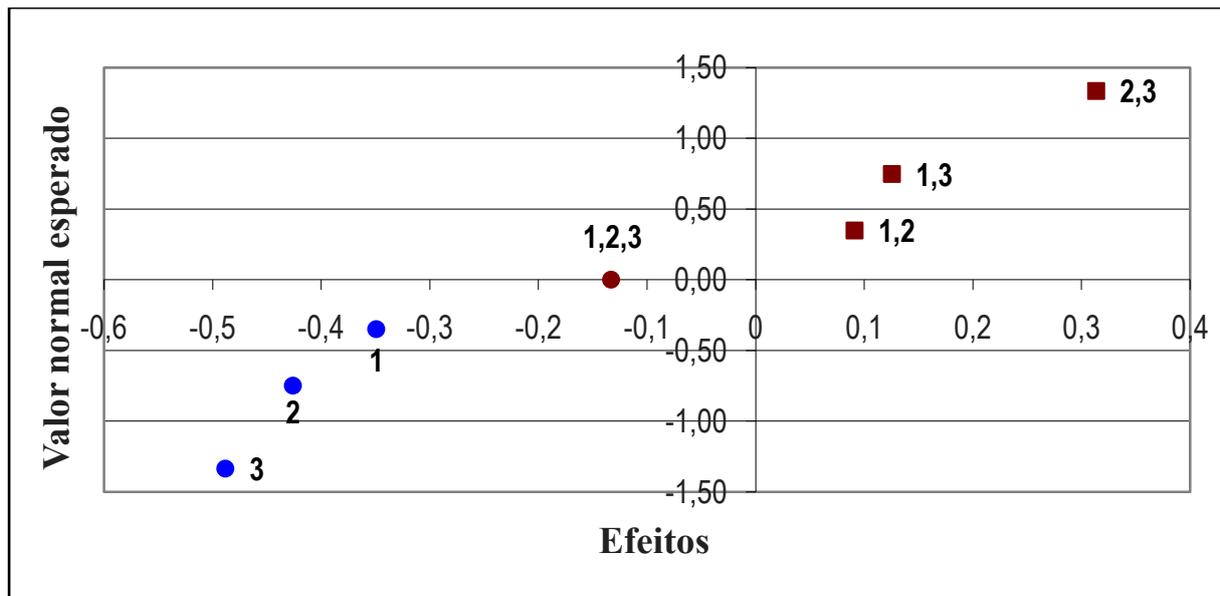


Figura 5. Gráfico de Probabilidade Normal

Dentre os fatores que podem influenciar a resistência de um concreto ou argamassa está o “fator água/aglomerante” ( $a/c$ ), que é a relação entre o peso de água e do aglomerante. Segundo Bauer [5], Tutikian e Helene [13] e Petrucci [14], a dependência inversa entre o fator água/aglomerante e a resistência à compressão para concretos foi estabelecida em 1918 pelo Prof. Duff A. Abrams. A chamada “Lei de Abrams”, mundialmente aceita até os dias de hoje, é utilizada para a formação da curva de correlação do fator água/aglomerante, em função de uma dada resistência a compressão do concreto, para uma determinada idade. Quanto maior for o fator água/aglomerante, menor será a resistência do concreto. Pela observação dos resultados de resistência à compressão, apresentados na Tabela 2, e fixando-se índice de substituição da lama de cal, comprova-se que todas as composições A2 ( $a/c=0,85$ ) apresentaram resultados inferiores aos apresentados pelas composições A1 ( $a/c=0,78$ ), corroborando os autores acima citados.

Segundo Petrucci [14], a resistência mecânica de uma argamassa depende do tipo e teor de aglomerante utilizado. O cimento Portland é o principal responsável pela resistência mecânica nas misturas convencionais. As misturas muito ricas em cimento Portland têm diminuídas a capacidade de se deformarem, sob a ação de um carregamento, sem fissurar. Por esse motivo acrescenta-se a cal hidratada a uma argamassa de cimento e areia, com o intuito de diminuir a sua resistência mecânica, aumentando, conseqüentemente, a sua ductilidade. Pela observação dos resultados de resistência à compressão, apresentados na Tabela 2, e fixando-se apenas nas composições que utilizaram a lama de cal sem tratamento térmico, comprova-se que as composições T25A1 e T25A2 apresentaram resultados superiores aos apresentados pelas outras composições, devido a maior quantidade de cal hidratada disponível nestas, por ser a lama de cal essencialmente calcita. A composição T25A1 teve desempenho mecânico superior, devido a menor quantidade de água utilizada nesta. Pode-se inferir a respeito dos resultados inferiores, obtidos para todas as composições que utilizaram a lama de cal tratada termicamente, a ocorrência de alguma condição não devidamente controlada no forno, durante o tratamento térmico, ou na hidratação subsequente.

## 4 CONCLUSÃO

Essa pesquisa teve como objetivo a análise do comportamento de argamassas preparadas com o resíduo industrial lama de cal, gerado no processo de produção de celulose. Com os resultados do planejamento fatorial foi determinado que a melhor taxa de substituição para lama de cal é de 25% (em relação à cal hidratada industrializada), sendo a melhor quantidade de água é 702 g (que produz um fator água/aglomerante de 0,78). Em relação ao tipo de lama de cal, foi possível determinar que o tratamento término, com a posterior rehidratação, reduziu a resistência final das argamassas, evidenciando a ocorrência de alguma condição não devidamente controlada no forno, durante o tratamento térmico, ou na hidratação subsequente. O traço T25A1 apresentou resultados promissores, mostrando a viabilidade técnica da utilização do resíduo lama de cal da indústria de celulose, para a produção de argamassas a serem utilizadas na construção civil, proporcionando um menor impacto ambiental e economia no descarte em aterros sanitários.

## Agradecimentos

Este trabalho contou com auxílios do Programa Institucional de Iniciação Científica FAPEMIG – CEFET-MG, Nº 135/16, de 07 de novembro de 2016.

## REFERÊNCIAS

- 1 GALBIATI, A.F. O gerenciamento integrado de resíduos sólidos e a reciclagem. Educação ambiental para o Pantanal. Disponível em [www.redeaguape.org.br/desc\\_artigo.php?cod=92](http://www.redeaguape.org.br/desc_artigo.php?cod=92). Acesso em: 06 dez. 2005.
- 2 IBÁ, Cenários Ibá. Boletim da Indústria Brasileira de Árvores. Jan/2018. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Cenarios/44\\_PDF\\_cenarios.pdf](http://iba.org/images/shared/Cenarios/44_PDF_cenarios.pdf)>. Acesso em: 21 maio 2018.
- 3 FORTI, E. Z. INFLUÊNCIA DA CAL HIDRATADA NAS CARACTERÍSTICAS DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO REALIZADA EM OBRA. 2017. 74 p. Dissertação (Engenharia Civil)- CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES, Lajeado, 2017. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1645/1/2017EduardoZambiasiForti.PDF>>. Acesso em: 21 maio 2018.
- 4 ABCP, 2002, Manual de revestimentos de argamassa. 1. ed. São Paulo, SP, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).
- 5 BAUER, L. A. Falcão. Materiais de Construção. 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- 6 ISENMANN, A. F. Química a partir de recursos renováveis / Armin Franz Isenmann. Timóteo, MG : 2012. 1a Edição
- 7 MAEDA, S.; COSTA, E. R. O.; SILVA, H. D. Uso de resíduos da fabricação de celulose e papel e da reciclagem de papel [recurso eletrônico]Colombo: Embrapa Florestas, 2010
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26 - Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2000
- 9 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211– Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro, 2005
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. Cimento Portland – Determinação de resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

- 12 GUIMARÃES, J., E., P.; GOMES, R., D.; SEABRA, M., A. Guia das Argamassas nas Construções. Construindo para sempre com cal hidratada. Associação Brasileira dos Produtores de Cal. 8. ed. 2004. 24 p. Disponível em: <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2013/06/guia-das-argamassas-nasconstruc3a7c3b5es-abpc-2007.pdf>. Acesso em 21 Maio 2018.
- 13 TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. V. 2. São Paulo: IBRACON, 2011.
- 14 PETRUCCI, E. G. R. Materiais de Construção. Porto Alegre: Globo, 1976.