

**SUBSTITUIÇÃO DA CAL HIDRATADA POR LAMA DE CAL, RESÍDUO
DA INDÚSTRIA DE CELULOSE, NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE
MÚLTIPLO USO**

HERBERT SANGI GONÇALVES

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ
SETEMBRO DE 2021**

SUBSTITUIÇÃO DA CAL HIDRATADA POR LAMA DE CAL, RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE, NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO

HERBERT SANGI GONÇALVES

“Dissertação apresentada ao PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ
SETEMBRO DE 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

G635

Gonçalves, Herbert Sangi.

Substituição da cal hidratada por lama de cal, resíduo da indústria de celulose, na produção de argamassas de múltiplo uso / Herbert Sangi Gonçalves. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

91 f.

Bibliografia: 82 - 91.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2021.

Orientador: Dylmar Penteado Dias.

1. Argamassa de múltiplo uso. 2. Cal hidratada. 3. Celulose. 4. Lama de cal. 5. Resíduo. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

SUBSTITUIÇÃO DA CAL HIDRATADA POR LAMA DE CAL, RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE CELULOSE, NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSAS DE MÚLTIPLO USO

HERBERT SANGI GONÇALVES

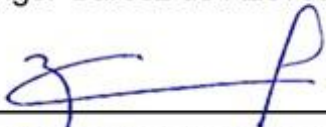
“Dissertação apresentada ao PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Aprovada em 10 de setembro de 2021.

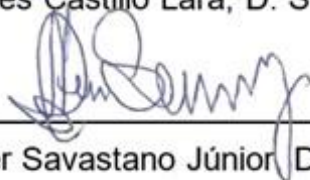
Comissão examinadora:



Prof. Afonso Rangel Garcez de Azevedo, D. Sc. - LECIV - UENF



Prof. Rancés Castillo Lara, D. Sc. - LECIV - UENF



Prof. Holmer Savastano Júnior, D. Sc. - FZEA - USP



Prof. Dylmar Penteado Dias, D. Sc. - LECIV - UENF (Orientador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e pela saúde, por sempre estar comigo, dando-me força nos momentos de incertezas, por me ajudar a superar os desafios dessa jornada e por tornar possível mais essa conquista em minha vida.

Aos meus pais, Evanir e Marilene, por sempre acreditarem em mim, apoiarem-me nos estudos e, mesmo nos momentos mais difíceis, nunca deixarem que nada me faltasse. Com carinho, amor e cuidado, desde os meus primeiros passos até hoje, ensinaram-me o real sentido de família e foram a base para que eu me tornasse o que sou. Por me ensinarem a ser justo, correto e honesto, independentemente de qualquer situação. Obrigado por todos os conselhos, orações e por acreditarem em meus sonhos.

Aos meus irmãos, Calebe e Marcus Vinícius, pela amizade e atenção dedicadas sempre que precisei.

À Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dylmar Penteado Dias, pela oportunidade de realizar esta pesquisa. Obrigado por me direcionar, com paciência e dedicação, e apresentar soluções diante de momentos de dúvidas durante a pesquisa. Obrigado pelos ensinamentos, por todo conhecimento transmitido e, principalmente, pela amizade durante o mestrado.

À toda equipe do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) e do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF, por proporcionarem a realização dos ensaios.

Aos meus amigos do mestrado, pelo companheirismo e pela troca de conhecimentos ao longo desses anos. Em especial, ao Renan Novaes, Jedson Batista, Joadelio Chagas, Markssuel Marvila e Rafael Cabral, pela ajuda nos experimentos deste trabalho.

À CENIBRA, empresa de celulose nipo-brasileira, pela doação da lama de cal, essencial para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos os demais, amigos e familiares, que de alguma maneira contribuíram para essa conquista.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Geral	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Justificativas	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Argamassas	5
2.1.1 Argamassa para assentamento	6
2.1.2 Argamassa para revestimento	7
2.2 Obtenção da polpa celulósica	8
2.2.1 Materiais lignocelulósicos	8
2.2.2 Tipos de processos para a obtenção da polpa celulósica	11
2.2.3 Processo Kraft de produção da polpa celulósica	12
2.2.4 Resíduos sólidos do processo Kraft	16
2.3 Trabalhos relacionados	20
3. MATERIAIS	25
3.1 Cimento Portland CPII-F 32	25
3.2 Cal hidratada CH-III	25

3.3 Lama de cal	26
3.3.1 <i>Granulometria a laser</i>	26
3.3.2 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	27
3.3.3 <i>Difração de raios X (DRX)</i>	28
3.3.4 <i>Termogravimetria e sua diferencial (TG e DTG)</i>	29
3.4 Areia.....	30
3.5 Água.....	31
3.6 Massa específica real	31
3.7 Composição química.....	33
4. MÉTODOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	35
4.1 Ensaio de mesa de consistência (<i>flow table test</i>).....	36
4.2 Determinação da dosagem ótima.....	38
4.2.1 <i>Teste de Dunnett</i>	41
4.2.2 <i>Teste de Tukey</i>	44
4.3 Evolução da resistência mecânica da argamassa LC100	45
4.4 Avaliação da viabilidade tecnológica da argamassa LC100	47
4.4.1 <i>Densidade de massa no estado fresco</i>	47
4.4.2 <i>Teor de ar incorporado</i>	49
4.4.3 <i>Retenção de água</i>	51
4.4.4 <i>Densidade de massa aparente no estado endurecido</i>	53
4.4.5 <i>Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade</i>	55

4.4.6 Resistência potencial de aderência à tração	59
4.4.7 Resistência à tração na flexão e à compressão	62
4.4.8 Comparação da argamassa LC100 com argamassas comerciais	66
4.5 Ensaaios analíticos das argamassas	67
4.5.1 Termogravimetria (TG) e sua diferencial (DTG)	67
4.5.2 Difração de raios X (DRX)	71
4.5.3 Calorimetria isotérmica	72
4.5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	77
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
5.1 Conclusões	79
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	80
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fragmento de uma cadeia de celulose (O'SULLIVAN, 1997).	8
Figura 2: Composição da parede celular vegetal (adaptado de RITTER, 2008).	9
Figura 3: Estrutura representativa de uma molécula de hemicelulose (EBRINGEROVÁ, 2005).....	10
Figura 4: Representação da macromolécula de lignina ligada à hemicelulose (MOORE <i>et al.</i> , 2011).....	10
Figura 5: Representação esquemática do processo Kraft de produção de polpa celulósica (adaptado de MATA, 2016).	13
Figura 6: (1) Lama de cal; (2) dregs; (3) grits (próprio autor).	17
Figura 7: Distribuição granulométrica por difração a laser da cal hidratada e da lama de cal.....	27
Figura 8 : Micrografias da lama de cal: a) aumento de 2000x; b) aumento de 5000x	27
Figura 9: Difrátômetro de raios X modelo MiniFlex 600, da marca Rigaku	28
Figura 10: Difratoograma de raios X da lama de cal.	29
Figura 11: Equipamento para análise termogravimétrica	29
Figura 12: Curvas TG e DTG da lama de cal.	30
Figura 13: Distribuição granulométrica da areia.	31
Figura 14: Frasco Le Chatelier em banho termorregulador.....	32
Figura 15: Espectrômetro de fluorescência de raios X.....	33
Figura 16: Espalhamento da argamassa na mesa de consistência.	38
Figura 17: Fôrmas cilíndricas de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro.....	39

Figura 18: Corpos de prova em cura ambiente de laboratório	39
Figura 19: Corpo de prova posicionado na prensa para o ensaio de compressão axial.....	40
Figura 20: Resistência à compressão axial aos 14 e 28 dias.....	41
Figura 21: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	46
Figura 22: Evolução da resistência mecânica da argamassa LC100 em função do tempo.	46
Figura 23: Recipiente metálico, com argamassa, utilizado para determinar a densidade de massa no estado fresco.....	48
Figura 24: Recipiente para ensaio de teor de ar incorporado.....	50
Figura 25: Dispositivo para ensaio de retenção de água.	51
Figura 26: Corpos de prova para determinação da densidade de massa no estado endurecido.....	54
Figura 27: Ensaio de absorção de água por capilaridade.	57
Figura 28: Substrato de concreto com argamassa para ensaio de aderência à tração.	59
Figura 29: Pastilhas metálicas para o ensaio de aderência à tração.	60
Figura 30: Ensaio de aderência à tração.....	60
Figura 31: Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração: (a) ruptura na interface substrato/argamassa; (b) ruptura na argamassa;.....	62
Figura 32: Ensaio de resistência à tração na flexão a 3 pontos: (a) corpo de prova no início do ensaio; (b) corpo de prova após a ruptura.	63
Figura 33: Ensaio de resistência à compressão: (a) corpo de prova no início do ensaio; (b) corpo de prova após a ruptura.	64

Figura 34: Curvas TG/DTG das argamassas LC0 e LC100.	69
Figura 35: Curvas TG/DTG da argamassa LC25.	69
Figura 36: Curvas TG/DTG da argamassa LC50.	70
Figura 37: Curvas TG/DTG da argamassa LC75.	70
Figura 38: Difratoograma de raios X das argamassas.	72
Figura 39: Calorímetro isotérmico.	73
Figura 40: Fluxo de calor das argamassas LC0 e LC100.	73
Figura 41: Estágio I de hidratação das argamassas LC0 e LC100.	74
Figura 42: Estágios II e III de hidratação das argamassas LC0 e LC100.....	75
Figura 43: Calor de hidratação das argamassas LC0 e LC100.....	76
Figura 44: Micrografia da argamassa LC0: a) com aumento de 2000x; b) com aumento de 5000x.....	77
Figura 45: Micrografia da argamassa LC100: a) com aumento de 1000x; b) com aumento de 2000x.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das argamassas segundo sua função na construção (CARASEK,2010).....	6
Tabela 2: Resíduos gerados em cada etapa de produção de celulose (MIRANDA, 2008).	17
Tabela 3: Composição química da lama de cal em diferentes trabalhos (OLIVEIRA, 1999; WOLFF, 2008; RODRIGUES, 2016; AMARAL, 2016).	19
Tabela 4: Caracterização da areia.	31
Tabela 5: Massa específica real das matérias-primas.	33
Tabela 6: Composição química das matérias-primas (% em peso).	34
Tabela 7: Quantidade dos materiais utilizados nas 5 argamassas avaliadas.	38
Tabela 8: Quadro ANOVA para resistência à compressão axial aos 14 dias.....	42
Tabela 9: Teste de Dunnett para resistência à compressão axial aos 14 dias.....	43
Tabela 10: Quadro ANOVA para resistência à compressão axial aos 28 dias.....	43
Tabela 11: Teste de Dunnett para resistência à compressão axial aos 28 dias.....	43
Tabela 12: Teste de Tukey para resistência à compressão axial aos 14 dias.	44
Tabela 13: Teste de Tukey para resistência à compressão axial aos 28 dias.	44
Tabela 14: Densidade de massa no estado fresco (ABNT NBR 13281, 2005).	49
Tabela 15: Teor de ar incorporado.	50
Tabela 16: Retenção de água (ABNT NBR 13281, 2005).	53
Tabela 17: Densidade de massa aparente no estado endurecido (ABNT NBR 13281, 2005).	55

Tabela 18: Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade (ABNT NBR 13281, 2005).....	58
Tabela 19: Resistência potencial de aderência à tração (ABNT NBR 13281, 2005). 61	
Tabela 20: Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração.	62
Tabela 21: Resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13281, 2005).	65
Tabela 22: Resistência à compressão (ABNT NBR 13281, 2005).	66
Tabela 23: Comparação entre a argamassa LC100 e argamassas comerciais da Votorantim.	67

RESUMO

Devido às suas dimensões territoriais e às condições climáticas, a indústria de celulose e papel cresce a cada ano no Brasil, proporcionando posição de destaque no mercado internacional devido ao volume de produção. Porém, com esse aumento, grande volume de resíduos é gerado. Um deles é a lama de cal, resultante do processo químico Kraft de polpação. A utilização de resíduos industriais no desenvolvimento de novos materiais tem sido objeto de diversas pesquisas na literatura, bem como de interesse dos segmentos geradores, uma vez que gerenciá-los representa gastos significativos, aumentando a ocupação de espaços e responsabilidades com a legislação ambiental. Assim sendo, o objetivo deste estudo foi avaliar a substituição da cal hidratada por lama de cal na produção de argamassas de assentamento e revestimento, a fim de verificar sua viabilidade para possível aplicação na indústria da construção civil. Argamassas cimentícias com 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição, em massa, de cal hidratada por lama de cal foram avaliadas para determinar o teor ótimo de substituição em função da resistência à compressão aos 14 e 28 dias. Após análise estatística dos resultados de resistência à compressão, verificou-se que a substituição de 100% da cal hidratada por lama de cal não afetou o comportamento mecânico do material. A análise de difração de raios X mostrou que a presença de dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] diminui à medida que o teor de lama de cal aumenta. Além disso, os resultados de calorimetria isotérmica indicaram que o processo de hidratação do cimento foi bastante semelhante para todas as argamassas. Os resultados de TG indicaram a presença de água livre, C-S-H, CH e CaCO_3 nas argamassas. Por fim, os resultados obtidos no programa experimental mostraram que a argamassa com substituição total da cal hidratada por lama de cal atende aos requisitos normativos para argamassas de uso múltiplo, desenvolvendo propriedades físicas e mecânicas necessárias para que sua aplicação seja confiável na construção civil.

Palavras-chave: lama de cal; argamassa sustentável; reciclagem de resíduos.

ABSTRACT

Due to its territorial dimensions and climatic conditions, the pulp and paper industry increases every year in Brazil, providing a prominent position in the international market due to the volume of production. However, because of this increasing, a large volume of wastes is generated. One of them is a lime mud, resulting from the Kraft chemical pulping production process. The use of industrial wastes in the development of new materials has been the subject of several researches in the literature, as well as of interest to the generating segments, since managing them represents significant expenses, increasing occupation of spaces and responsibilities with the environmental legislation. Thus, the aim of this study is to evaluate the replacement of hydrated lime by lime mud in the production of mortars for laying and coating, in order to verify its feasibility for possible application in the civil construction industry. Cement-based mortars with 0, 25, 50, 75 and 100% of hydrated lime mass substitution by lime mud were evaluated to determine the optimal substitution level as a function of 14 and 28 days compressive strength. After statistically analyzing the compressive strength results, it was verified that replacing 100% of the hydrated lime with lime mud does not affect the mechanical behavior of the material. XRD analysis showed that the presence of dolomite $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ decreases as the lime mud content increases. Additionally, isothermal calorimetry results indicated that the cement hydration process was quite similar in all mortars. The TG/DTG results indicated the presence of free water, C-S-H, CH and CaCO_3 in the mortars. Finally, the results obtained in the experimental program showed that the mortar with total replacement of hydrated lime by lime mud meets the normative requirements for multiple-use mortars, developing the necessary physical and mechanical properties for its reliable application in civil construction.

Keywords: Lime mud; sustainable mortar; waste recycling.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O rápido crescimento da quantidade de resíduos industriais é um dos principais motivos que tem levado os países a adotarem políticas ambientais e sustentáveis mais severas. No Brasil, por exemplo, a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010 foi um marco nesse sentido. Essa política trata da gestão dos resíduos associada a modelos de logística, bem como se preocupa com a destinação desses resíduos em ações de reaproveitamento (DEUS *et al.*, 2017).

O gerenciamento de resíduos sólidos precisa ser tratado com bastante atenção, tanto do ponto de vista ambiental e industrial quanto da saúde pública, para que esses materiais sejam dispostos de forma segura e econômica ou, de preferência, sejam reciclados. Segundo Fetene *et al.* (2018), a falta de políticas e práticas de gestão de resíduos sólidos integradas representa ameaça ao desenvolvimento sustentável nas cidades. Dessa forma, uma maneira de prevenir um desequilíbrio ecológico é a utilização de diferentes tipos de resíduos como matérias-primas na produção de materiais sustentáveis.

Na área da Construção Civil, ações voltadas à sustentabilidade ainda sofrem certa resistência, tanto por parte das empresas do ramo como do mercado consumidor. Um dos grandes desafios da Construção Civil é reduzir o consumo de matérias-primas naturais, como no caso do cimento, cuja produção é bastante prejudicial ao meio ambiente. Outro exemplo é a produção da cal, que para cada tonelada produzida demanda a extração de aproximadamente 2 toneladas de rocha calcária, além de liberar grande quantidade de dióxido de carbono na atmosfera (MYMRIN *et al.*, 2015; CONTRERAS *et al.*, 2016).

A cal é bastante utilizada em argamassas na Construção Civil. Em geral, as argamassas de múltiplo uso são compostas por cimento, cal e areia em quantidades que variam conforme sua aplicação, tais como: assentamento de blocos, revestimento de paredes e tetos, camadas de regularização, entre outras. Dessa forma, a busca por alternativas que reduzam o consumo da cal é importante para a

sustentabilidade na Construção Civil. Nessa perspectiva, a substituição da cal por lama de cal - resíduo da indústria de papel e celulose - em argamassas surge como uma possível solução.

Estudos acerca da incorporação de resíduos da indústria de papel e celulose no desenvolvimento de materiais de construção vêm sendo realizados, como em tijolos (GOEL e KALAMDHAD, 2017), geopolímeros (NOVAIS *et al.*, 2018), concretos (BUI *et al.*, 2019), compósitos (MYMRIN *et al.*, 2020) e argamassas (BORINAGA-TREVIÑO *et al.*, 2021).

Ante o exposto, neste trabalho foi utilizada a lama de cal em substituição à cal hidratada na produção de argamassas de múltiplo uso, especialmente em função do ineditismo desse estudo. A lama de cal é um resíduo sólido inorgânico gerado pela indústria de papel e celulose durante a etapa de recuperação química dos reagentes no processo Kraft. Este processo químico é o mais comum na fabricação da polpa celulósica. No entanto, gera grande volume de resíduos sólidos, tornando-se desvantajoso do ponto de vista econômico, devido aos custos com a disposição em aterros, e impróprio do ponto de vista sustentável, devido ao impacto ambiental gerado.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

O propósito geral desta pesquisa foi avaliar a substituição da cal hidratada por lama de cal na confecção de argamassas de múltiplo uso, bem como verificar se as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais produzidos alcançaram níveis suficientes, especificados em normas, para aplicação confiável na Construção Civil.

1.2.2. Específicos

Para se atingir o objetivo geral deste estudo, fez-se necessária a análise dos seguintes parâmetros:

- revisão bibliográfica;
- caracterização dos materiais:
 - cal hidratada;
 - lama de cal;
- determinação do teor de substituição ideal;
- avaliação de parâmetros importantes para argamassas, tais como:
 - resistência à compressão axial;
 - densidade de massa aparente no estado endurecido;
 - resistência à tração na flexão;
 - absorção de água;
 - densidade de massa aparente no estado fresco;
 - teor de ar incorporado;
 - retenção de água;
 - resistência potencial de aderência à tração;
- utilização de técnicas analíticas para caracterizar as argamassas produzidas, a saber:
 - difração de raios X;
 - microscopia eletrônica de varredura;
 - termogravimetria e sua diferencial;
 - calorimetria isotérmica.

1.3. Justificativas

O aproveitamento de resíduos industriais no desenvolvimento de novos materiais tem sido objeto de pesquisas em várias instituições de ensino superior, bem como de interesse dos segmentos geradores, já que a gestão dos mesmos representa despesas significativas, ocupação crescente de espaços e responsabilidades com a legislação ambiental. Além disso, a adequação de diversos setores às práticas sustentáveis, como redução, reutilização e reciclagem de resíduos, melhora a imagem das empresas, conduz a resultados econômicos atraentes e diminui os riscos de passivos ambientais.

Por suas dimensões territoriais e condições climáticas, o Brasil registrou, em relação à 2017, crescimento médio anual de 8% para a indústria de papel e celulose, o que proporcionou posição de destaque no mercado internacional, devido ao volume de produção. No entanto, como consequência desse crescimento, grandes volumes de resíduos foram gerados (aproximadamente 15,1 milhões de toneladas, de acordo com Ibá, 2020).

O potencial aproveitamento desses resíduos alcalinos da indústria de papel e celulose como matéria-prima na produção de materiais e componentes de construção, aliado às rigorosas legislações e processos de licenciamento ambientais, podem representar interessante alternativa para o aumento da vida útil dos aterros sanitários, bem como proporcionar a produção de materiais sustentáveis.

Seguindo nessa linha de pensamento, esta pesquisa utilizou a lama de cal - resíduo de processos industriais -, que possui grande disponibilidade no território nacional, para a produção de argamassas de múltiplo uso com propriedades confiáveis na Construção Civil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz, de maneira sucinta, conceitos, propriedades e aplicações de argamassas. Aborda também materiais lignocelulósicos e processos para a obtenção da polpa celulósica, descrevendo de modo aprofundado o processo químico Kraft, bem como os resíduos gerados nesse processo. Por último, são colecionados alguns trabalhos inerentes ao tema principal desta pesquisa, ou seja, substituição da cal hidratada por lama de cal na produção de argamassas para assentamento e revestimento.

2.1 Argamassas

Segundo a ABNT NBR 13281 (2005), argamassa é definida como uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes inorgânicos (cimento, cal hidráulica, cal aérea e gesso), agregado miúdo (areia natural ou resultante de britagem) e água. Tal mistura pode conter ou não aditivos e apresenta propriedades de aderência e endurecimento. São exemplos de aditivos: incorporadores de ar, inibidores de retração, impermeabilizantes, redutores e aceleradores de pega, modificadores de viscosidade e redutores de água (plastificantes ou superplastificantes).

Embora a norma não cite que argamassas possam conter adições, não há óbice para tal. Materiais pozolânicos, como o metacaulim e a sílica ativa, são exemplos de adições. Dessa forma, vale ressaltar a diferença entre aditivos e adições. Enquanto os aditivos são produtos químicos adicionados em pequenas quantidades e que não apresentam propriedades ligantes capazes de modificar a cinética de hidratação do cimento, as adições são compostos de origem mineral, geralmente utilizados em quantidades maiores em substituição ao cimento, com o objetivo de promover características especiais.

As argamassas são materiais de construção utilizados em diversas aplicações. Suas principais aplicações envolvem o assentamento de alvenaria e o revestimento de paredes e tetos. Podem ser classificadas de acordo com alguns critérios, como, por exemplo, quanto ao tipo e número de aglomerantes, plasticidade, consistência, forma de preparo e fornecimento (CARASEK, 2010).

Quanto à função que desempenham, as argamassas são classificadas conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação das argamassas segundo sua função na construção (CARASEK,2010).

Função	Tipo
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)
	Argamassa de fixação (ou encunhamento) - alvenaria de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco
	Argamassa de emboço
	Argamassa de reboco
	Argamassa de camada única
	Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso
	Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas - colante
	Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Como observado na Tabela 1, existem argamassas de vários tipos e que desempenham diferentes funções. No entanto, esta pesquisa preocupou-se em avaliar as propriedades tecnológicas somente das argamassas de múltiplo uso, as quais são usadas para assentamento e revestimento de elementos construtivos.

2.1.1 Argamassa para assentamento

As argamassas de assentamento são utilizadas para unir blocos cerâmicos convencionais ou outros materiais estruturais, por isso são empregadas principalmente na construção de paredes e muros.

Para que apresentem bom desempenho, as argamassas de assentamento devem apresentar propriedades adequadas relacionadas à trabalhabilidade, aderência, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações.

De acordo com Bezerra (2010), são funções das argamassas para assentamento: contribuir na resistência de esforços laterais, selar as juntas para evitar a penetração da água decorrente das chuvas, distribuição uniforme das cargas atuantes na parede por toda área resistente aos elementos de alvenaria e absorção de deformações que ocorram naturalmente na alvenaria, como as originadas por retração térmica, por secagem ou outras.

2.1.2 Argamassa para revestimento

As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes, tetos e muros. O revestimento integra o sistema de vedação das edificações e contribui para o isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste. Além disso, ainda protege a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo, regulariza a superfície dos elementos de vedação e serve de base para acabamentos decorativos (SANTOS, 2008).

A ABNT NBR 13749 (2013) estabelece que o revestimento de argamassa deve apresentar textura uniforme, sem imperfeições, quais sejam: cavidades, fissuras, manchas e eflorescências. A aceitação ou rejeição desse revestimento deve ser especificada como requisito de projeto, conforme as exigências e os níveis de tolerância admitidos. Da mesma forma que as argamassas de assentamento devem apresentar determinadas propriedades, as argamassas de revestimento também o devem, para que suas funções sejam alcançadas.

Nesse sentido, vale ressaltar que a função de proteção dos revestimentos está diretamente relacionada à durabilidade das construções, ao evitar a ação dos agentes agressivos ou deletérios sobre as superfícies. Deve-se ter atenção ao fato de que os revestimentos não devem ser utilizados para ocultar imperfeições grosseiras na alvenaria ou na estrutura, a exemplo do desaprumo e desalinhamento decorrentes de falhas na execução das paredes. Isso é prejudicial para a eficiência do sistema construtivo, pois aumenta o peso da estrutura, além de torná-la mais

onerosa, visto que demandará maior quantidade de material e a necessidade de mais tempo para a execução do serviço.

2.2 Obtenção da polpa celulósica

2.2.1 Materiais lignocelulósicos

A madeira é a principal fonte para a obtenção de fibras celulósicas, sendo composta essencialmente por materiais lignocelulósicos: celulose, hemicelulose e lignina. O processo de produção da celulose consiste na separação das fibras, com o menor desgaste possível, por meio da solubilização e remoção da lignina, que atua como um agente ligante. Essa parte do processo recebe o nome de polpação (ALVES *et al.*, 2015).

2.2.1.1 Celulose

Segundo O'Sullivan (1997), as moléculas de celulose são encontradas nas paredes celulares das plantas e se organizam em extensas fibras, formando uma longa cadeia rígida e compacta, conforme mostra a Figura 1.

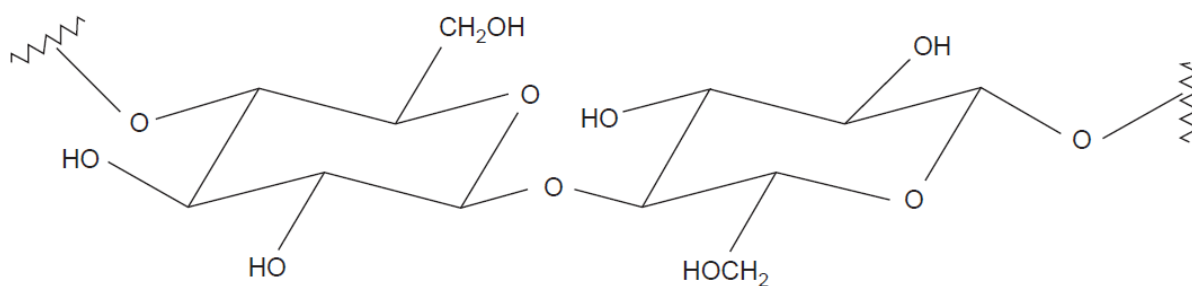


Figura 1: Fragmento de uma cadeia de celulose (O'SULLIVAN, 1997).

A celulose está associada a outros componentes, como a hemicelulose, pectina, proteínas e lignina. As moléculas de hemicelulose estruturam as fibras de celulose e a lignina ocupa os espaços entre esses componentes (DAVISON *et al.*, 2013). Essa organização é mostrada na Figura 2.

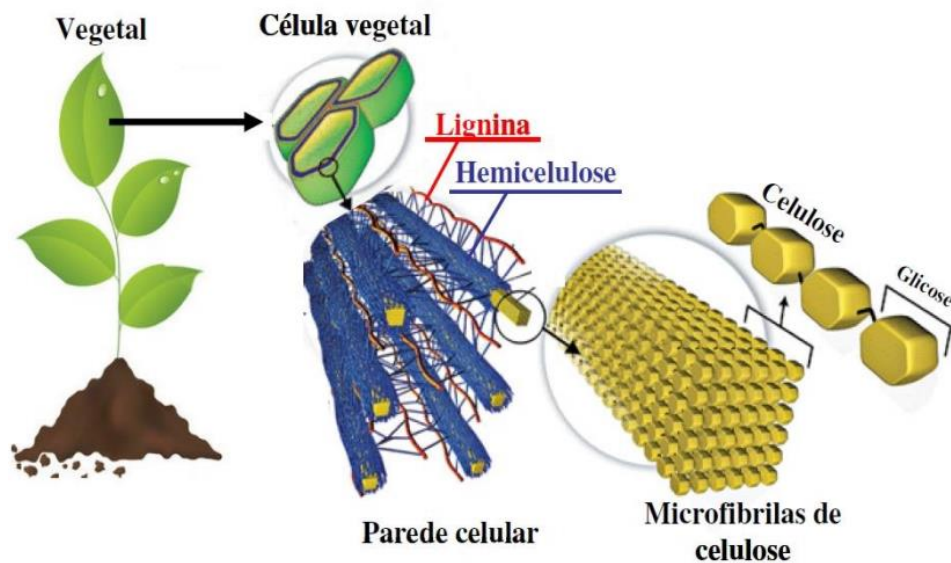


Figura 2: Composição da parede celular vegetal (adaptado de RITTER, 2008).

Segundo Zhao *et al.* (2012), a celulose é um carboidrato formado por unidades de glicose e a quantidade dessas unidades na cadeia de uma molécula de celulose determina uma propriedade importante: seu grau de polimerização. Um alto grau de polimerização prejudica a ação de enzimas celulolíticas, o que diminui a digestibilidade da celulose e contribui para formar uma estrutura maior e mais resistente.

Outra propriedade importante é a cristalinidade. A presença das ligações de hidrogênio cria regiões cristalinas, que são mais resistentes à ação das enzimas celulolíticas e, conseqüentemente, diminuem a digestibilidade da celulose (CALIARI *et al.*, 2017).

2.2.1.2 Hemicelulose

A hemicelulose, também chamada de poliose, compõe até 35% da massa do material lignocelulósico. No geral, hemiceluloses são polissacarídeos de estrutura amorfa com cadeia ramificada (Figura 3), mas podem apresentar composição e estrutura variável de uma planta para outra (TRAJANO *et al.*, 2013). Segundo Davison *et al.* (2013), na parede celular vegetal as fibrilas de celulose estão imersas em uma matriz de hemicelulose, formando ligações não covalentes. Em razão dessas características estruturais, a hemicelulose é menos resistente à conversão do que a celulose.

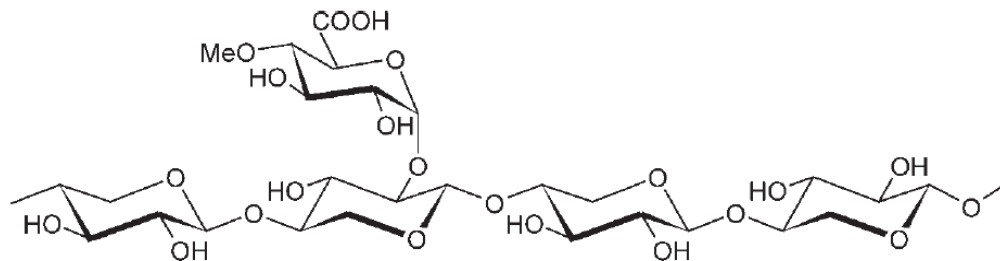


Figura 3: Estrutura representativa de uma molécula de hemicelulose (EBRINGEROVÁ, 2005).

2.2.1.3 Lignina

Segundo Moore *et al.* (2011), a lignina é uma macromolécula polifenólica tridimensional ligada à hemicelulose e que envolve parcialmente os polissacarídeos e microfibrilas de celulose na parede celular de plantas (Figura 4).

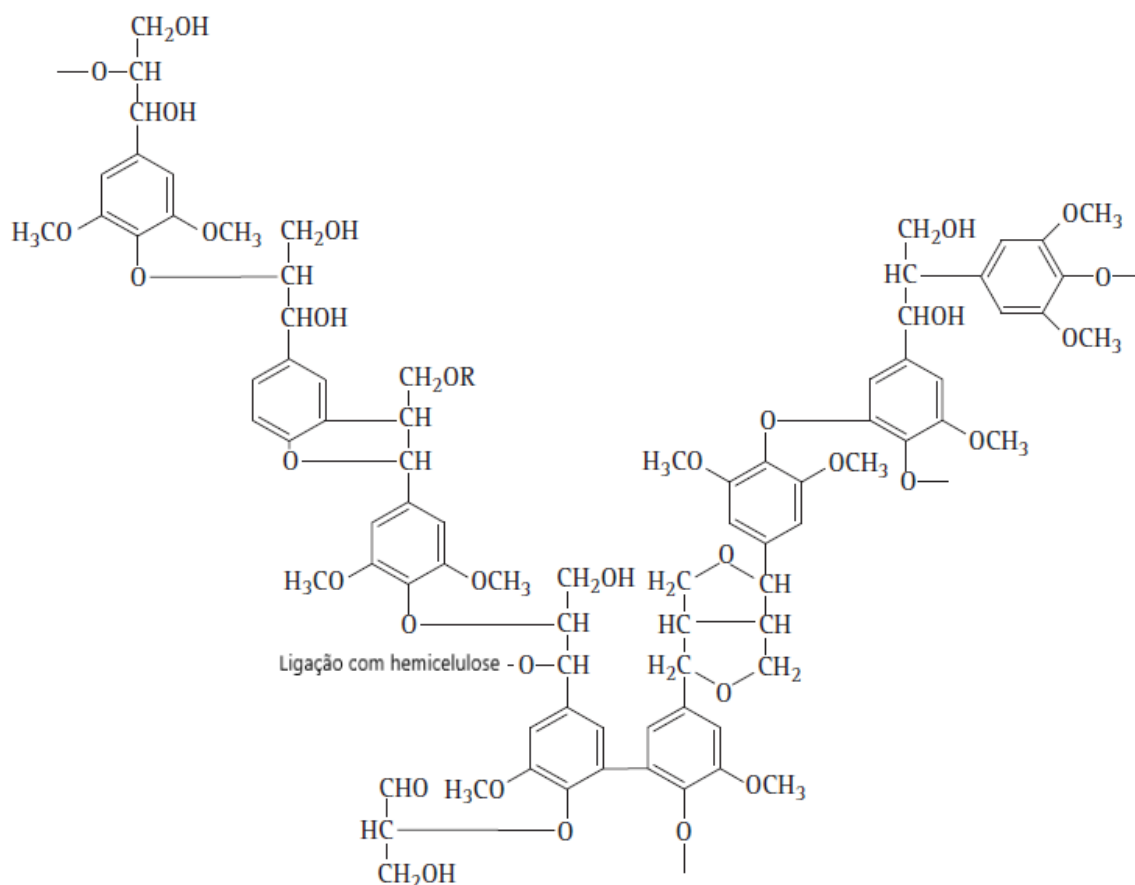


Figura 4: Representação da macromolécula de lignina ligada à hemicelulose (MOORE *et al.*, 2011).

A lignina facilita o transporte de água e nutrientes pela planta, fornece suporte mecânico e elástico e dificulta a entrada de patógenos microbianos. Percebe-se que é mais abundante em plantas lenhosas, o que garante maior resistência a ataques contra sua integridade estrutural (PALONEN, 2004). Segundo Lu *et al.* (2002), essa resistência dificulta o acesso à celulose, pois a lignina funciona como barreira física e química contra a ação de enzimas celulolíticas.

2.2.2 Tipos de processos para a obtenção da polpa celulósica

Segundo Piotto (2003), a produção da pasta celulósica varia de acordo com as características pretendidas para o produto final e com o processo utilizado para a remoção da lignina das fibras. Os diferentes métodos para preparar a polpa celulósica são: processo mecânico, termomecânico, semiquímico e os químicos – sulfito, sulfato e Kraft.

No processo mecânico, as toras de madeira são reduzidas a uma pasta fibrosa (*groundwood*), depois de prensadas a úmido contra um rolo giratório que possui uma superfície abrasiva. Esse processo pode alcançar rendimento variando de 93 a 98% e utiliza, preferencialmente, toras de madeiras coníferas. No entanto, não é possível separar completamente as fibras dos demais constituintes da madeira. Por conseguinte, obtém-se uma pasta barata, cuja aplicação é limitada, visto que o papel feito com ela tende a escurecer mais rápido, ainda que passe pelo branqueamento, devido à oxidação da lignina residual. Em razão dessas características, a pasta fibrosa é bastante empregada na fabricação de papel para jornal, revistas, embrulhos e toaletes (PIOTTO, 2003).

No processo termomecânico, a madeira, em forma de cavacos, é aquecida com vapor, em torno de 140°C, passando do estado rígido para o plástico. Em seguida, é submetida a um desfibramento em refinador a disco. Neste processo, a pasta celulósica tem um rendimento um pouco abaixo do que no processo mecânico, 92 a 95%, porém é de melhor qualidade, proporcionando maior resistência mecânica e melhor imprimabilidade aos papéis produzidos com ela (PIOTTO, 2003).

O processo semiquímico combina métodos químicos e mecânicos. Nele os cavacos de madeira são parcialmente amolecidos com reagentes químicos, que são

acrescentados em baixos teores, e a complementação da polpação é feita mecanicamente. Esse processo alcança rendimentos entre 60 e 90%. O processo semiquímico mais utilizado é o Sulfito Neutro Semiquímico (NSSC).

Já no processo químico sulfito, os cavacos de madeira são cozidos em digestores que contêm um licor ácido composto por enxofre (SO_2) e uma base – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , NH_4OH . A pasta obtida nesse processo tem rendimento entre 40 e 60% e apresenta coloração clara. Embora seja de fácil branqueamento, pode ser usada até mesmo sem ser branqueada. Em face da dificuldade de regenerar os produtos químicos e das consequentes contaminações das águas, esse processo foi substituído pelo processo químico sulfato (JULIANI, 2015).

No processo químico Kraft os cavacos de madeira são aquecidos em um digestor com soda caustica e sulfeto de sódio. Esse processo alcança rendimento entre 50 e 60% e produz uma pasta celulósica forte, que preserva a resistência das fibras de lignina dissolvidas. Por isso é denominado Kraft, que significa forte em alemão. A grande vantagem oferecida por esse processo em relação aos demais é a possibilidade de recuperação de subprodutos e reagentes químicos. No entanto, têm como desvantagens: maiores investimentos na construção da sua planta e gasto extra com a operação de branqueamento, pois a celulose obtida é pouco clara (JULIANI, 2015).

Finalmente, no processo químico sulfato são utilizados os mesmos produtos químicos do Kraft. No entanto, a diferença entre eles deve-se às condições mais rígidas usadas no processo sulfato, que emprega maior quantidade de sulfeto de sódio e de soda caustica, além de temperaturas mais elevadas e maior tempo de cozimento. A pasta celulósica obtida nesse processo possui boas propriedades físicas e mecânicas, pois também preserva a resistência das fibras de lignina dissolvidas (PIOTTO, 2003).

Assim, o próximo item aborda com maiores detalhes o processo químico Kraft de produção da polpa celulósica, visto que a lama de cal, resíduo utilizado nesta pesquisa, é proveniente desse processo.

2.2.3 Processo Kraft de produção da polpa celulósica

Os processos químicos são os que geram a polpa celulósica mais pura. O processo químico Kraft é o processo mais utilizado no Brasil e no mundo para

separar a celulose da lignina (ALVES *et al.*, 2015).

Segundo Colodette e Gomes (2015), o processo Kraft de produção de celulose consiste no cozimento de cavacos de madeira em uma solução alcalina forte de soda cáustica (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), conhecida como licor branco, que, pelo efeito de pressão e da temperatura entre 160 e 180°C, levam à separação das fibras e dissolução das moléculas de lignina. O processo Kraft possui como principal característica a recuperação química e energética eficiente dos reagentes utilizados, que retornam ao digestor com perda máxima de 5%. Além disso, permite a obtenção de uma celulose mais resistente e subprodutos valiosos.

Com a queima da matéria orgânica presente no licor residual de cozimento (licor preto) na caldeira de recuperação, são gerados energia e vapores que são utilizados em outras etapas do processo. Já a parte da madeira que está em forma de pasta é utilizada como biocombustível para geração de energia térmica e elétrica em fábricas de celulose (FOELKEL, 2011).

As indústrias que operam com o processo Kraft são compostas basicamente por dois setores principais: um encarregado pela produção da polpa de celulose e papel e um responsável pela recuperação química dos reagentes, como mostra a Figura 5. E, devido à interação entre esses dois setores, este processo pode ser considerado como de ciclo fechado. Vale destacar que a recuperação química dos reagentes é de grande importância, de modo a permitir viabilidade econômica e ambiental neste processo produtivo.

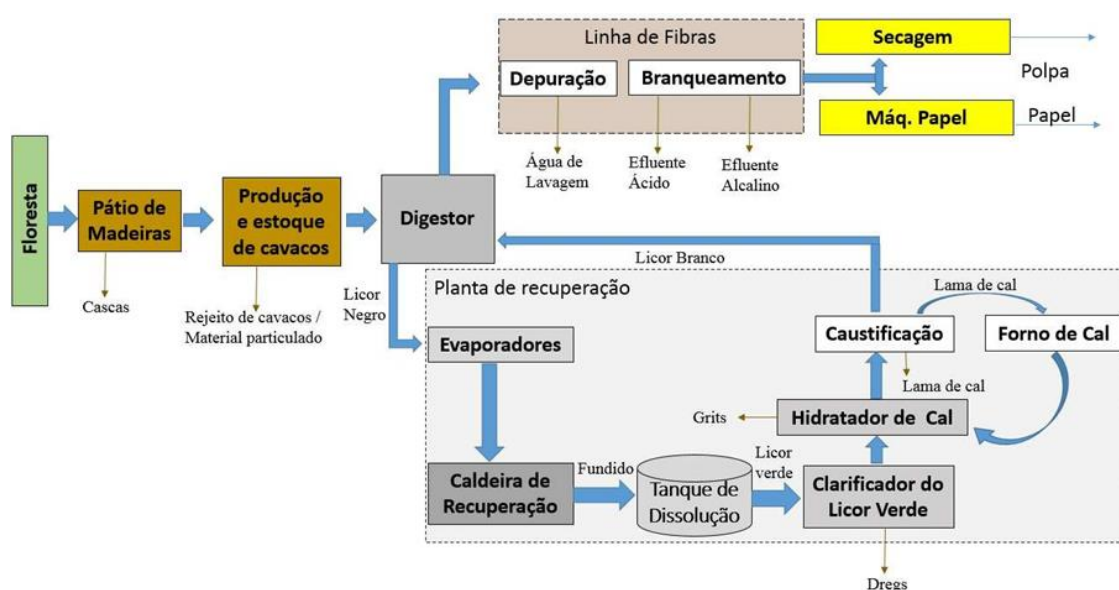


Figura 5: Representação esquemática do processo Kraft de produção de polpa celulósica (adaptado de MATA, 2016).

O processo Kraft se origina em áreas florestais, onde as árvores são derrubadas e desganhadas. Em seguida, as toras são cortadas e enviadas para as indústrias para serem armazenadas em pátios de estocagem. A fim de melhorar o rendimento da celulose, as toras são descascadas, uma vez que as cascas prejudicam as propriedades físicas do produto e elevam o teor de sujeira na pasta. As toras de madeira descascadas são então picotadas em fragmentos (cavacos) com dimensões adequadas e uniformes, de modo a garantir um cozimento homogêneo (GUERRA, 2007).

Os cavacos de madeira são aquecidos no digestor juntamente com licor branco, onde ocorre a degradação da lignina e a separação das fibras, resultando em uma polpa escura. Logo após, essa polpa é conduzida para uma seção de lavagem, para que os produtos químicos utilizados e os compostos orgânicos dissolvidos sejam removidos. A polpa lavada segue para a etapa de depuração (peneiramento) e branqueamento. Já o restante da pasta, composta por um licor residual de coloração escura, permanece no digestor e é denominada de licor negro. No peneiramento são retiradas algumas impurezas comuns no processo, como areia, cavacos não cozidos, nós e feixes de madeira, e no branqueamento são adicionados produtos químicos à pasta para a remoção da lignina residual e outras partículas que lhe conferem cor. A massa branqueada, no último estágio do processo, passa por uma secagem, formando uma folha contínua que é resfriada, cortada em folhas individuais com medidas pré-definidas, enfardada, pesada e, por fim, expedida.

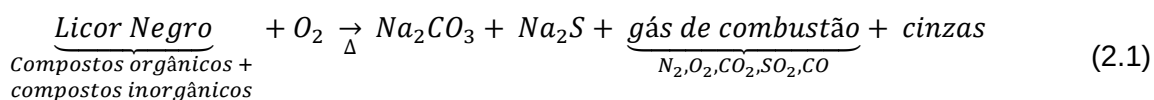
O licor negro segue para uma unidade de evaporação para elevar a concentração de sólidos. Posteriormente, essa mistura é enviada para a caldeira de recuperação, onde a queima da matéria orgânica fornece energia térmica suficiente para produzir vapores e eletricidade. No decorrer da queima do licor negro, ocorre a conversão dos compostos orgânicos ligados ao sódio (Na) em carbonato de cálcio (CaCO_3) e dos ligados ao enxofre (S) em sulfeto de sódio (Na_2S). Além disso, ainda pode ocorrer a formação de sulfato de sódio (Na_2SO_4). Essa pasta inorgânica de sais minerais fundidos, conhecida como *smelt*, flui para um tanque de dissolução, onde será dissolvida por uma solução aquosa de licor branco fraco, resultando em um licor verde.

O licor verde é conduzido para um clarificador, onde passa por uma etapa de purificação para eliminação dos dregs, que são impurezas insolúveis constituídas pelo material não queimado na caldeira, areia e compostos metálicos. Por sedimentação, os dregs se depositam no fundo de um tanque cônico, sendo raspados e descarregados em outro tanque, onde são lavados e separados do sistema por um filtro rotativo.

O licor verde clarificado ($\text{NaCO}_3 + \text{Na}_2\text{S}$) é enviado ao hidratador de cal, onde é misturado com uma dosagem de cal para formar o licor branco ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$) e a lama de cal (CaCO_3). A quantidade de cal que não reage é sedimentada e retirada do hidratador. Esse resíduo é conhecido como grits. O licor branco e a lama de cal seguem para os caustificadores, onde são separados por precipitação. O licor branco é então bombeado para os digestores e a lama de cal segue para a lavagem, fechando assim a caustificação ou “ciclo sódio”.

A lavagem da lama de cal tem o objetivo de retirar dela toda a soda (NaOH) possível antes da etapa de calcinação. A água empregada nessa lavagem é reutilizada na caldeira de recuperação para dissolver o *smelt*, pois se classifica como licor branco fraco. A lama de cal lavada é conduzida ao forno de cal, onde se converte em cal virgem (CaO) e libera dióxido de carbono (CO_2). Se o teor de impurezas na lama de cal for alto, ou quando há excesso de produção, ela não é enviada ao forno de cal e deve ser retirada do sistema. Após a formação da cal virgem nos fornos, ela retorna ao hidratador de cal e se converte em Ca(OH)_2 (cal hidratada), estando apta para ser utilizada nos caustificadores e gerar mais licor verde, fechando assim o apagamento ou “ciclo cálcio”.

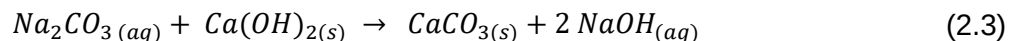
As reações nos ciclos de apagamento e caustificação ocorrem simultaneamente e favorecem o desenvolvimento do processo. Em resumo, as reações são mostradas nas Equações 2.1 a 2.4.



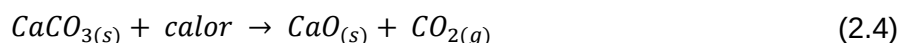
- Ciclo cálcio: hidratação ou apagamento da cal virgem



- Ciclo sódio: caustificação



- Calcinação



Essas reações químicas de recuperação asseguram eficiência e viabilidade econômica e ambiental na produção de celulose pelo processo Kraft.

2.2.4 Resíduos sólidos do processo Kraft

A indústria de papel e celulose gera grandes quantidades de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos, que variam em função da disposição e capacidade tecnológica da planta industrial, dos insumos que são utilizados no processo e do cuidado e responsabilidade dos operadores e gestores. Os resíduos provenientes do processo Kraft não variam muito quanto ao tipo, mas a variação das quantidades geradas é bastante expressiva. Portanto, quanto mais eficiente for o sistema empregado, menos resíduos são gerados por tonelada de celulose produzida (FOELKEL, 2011).

Os principais resíduos industriais gerados durante o processo são:

- resíduos lenhosos, como cascas de madeira e serragem;
- sólidos originados na recuperação química do licor negro, como:
 - dregs: impurezas insolúveis do licor verde oriundas do tanque de dissolução dos sais fundidos;
 - grits: cal não reagida na caustificação;
 - lama de cal: obtida durante a manutenção do forno de cal;
 - cinzas: provenientes da combustão da caldeira de recuperação;
- lodos primários e biológicos: provenientes da estação de tratamento de efluentes.

A Tabela 2 relaciona as etapas de produção de celulose com os resíduos que são gerados em cada uma delas.

De acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), os dregs, os grits e a lama de cal (Figura 6) são classificados como resíduos da Classe IIA, uma vez que são considerados não perigosos e não inertes.

Tabela 2: Resíduos gerados em cada etapa de produção de celulose (MIRANDA, 2008).

Etapa	Resíduo
Descascamento	Casca suja
Picagem dos cavacos	Serragem
Cozimento	Licor negro, dregs e grits
Lavagem	Lodo orgânico
Branqueamento	Lama de cal
Caldeira de biomassa	Cinzas



Figura 6: (1) Lama de cal; (2) dregs; (3) grits (próprio autor).

O termo *dregs* refere-se à escória ou sedimento. São impurezas não solúveis de cor escura, constituídas de material não queimado na caldeira de recuperação e produzidos no estágio de purificação do licor verde, que antecede a caustificação.

Essa purificação ocorre em um clarificador de fundo cônico, onde os dregs são sedimentados e descarregados em um tanque, de onde seguem para um lavador e são removidos do processo por um filtro rotativo (SOARES, 2018).

O termo *grits* significa grânulos. Eles são resíduos insolúveis provenientes da hidratação da cal virgem ou óxido de cálcio (CaO) para formar hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 . A cal produzida durante a calcinação da lama no forno não é totalmente pura e nem completamente reativa. Por isso sobram impurezas de compostos vitrificados, como areia, carbonato de cálcio não reativo, entre outros, que são retirados do processo e denominados como grits (FOELKEL, 2011).

2.2.4.1 Lama de cal

A lama de cal é formada na etapa de caustificação do licor verde, sendo separada e enviada para o forno de cal, onde é calcinada para que o óxido de cálcio (CaO) seja regenerado e retorne ao processo de caustificação, eliminando a geração de resíduos e a necessidade de aquisição de cal nova (FOELKEL, 2011).

Há geração de resíduos quando o forno de cal apresenta algum tipo de problema na manutenção ou operação, porque começa a sobrar lama. Assim, é necessário comprar cal nova até a solução do problema no forno, visto que as fábricas não costumam parar sua produção.

Conforme descrito no item 2.2.4, a lama de cal é um resíduo da produção de celulose classificado como IIA (não inerte), pois contém teores de sulfato, sódio e cloro dentro dos limites aceitáveis (ABNT NBR 10004, 2004). No entanto, não se pode afirmar que esses resíduos não oferecem risco ao meio ambiente, pois qualquer resíduo que não seja destinado de forma correta tem potencial de gerar danos ambientais.

A lama de cal é um resíduo sólido, homogêneo, de aspecto acinzentado e sem odor característico. Como é obtida após o processo de lavagem, normalmente possui umidade relativamente alta (WOLFF, 2008). É constituída principalmente de óxido de cálcio (CaO), mas possui outros óxidos em proporções menores, como Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , cujo teor pode variar de acordo com o tipo de processo. A Tabela 3 compara a composição química da lama de cal utilizada em diferentes trabalhos encontrados na literatura.

Tabela 3: Composição química da lama de cal em diferentes trabalhos (OLIVEIRA, 1999; WOLFF, 2008; RODRIGUES, 2016; AMARAL, 2016).

Óxido (%)	Oliveira (1999)	Wolff (2008)	Rodrigues (2016)	Amaral (2016)
SiO₂	0,37	0,98	1,68	1,33
Al₂O₃	1,96	0,15	0,25	-
CaO	53,22	55,8	53,1	59,37
Fe₂O₃	0,09	0,18	0,14	0,18
K₂O	0,04	0,03	0,08	-
Na₂O	0,74	0,37	1,7	-
MgO	0,83	0,55	0,88	-
MnO	-	0,01	0,05	-
TiO₂	0,03	0,05	0,05	-
P₂O₅	-	-	0,82	-
SrO	-	-	-	0,22
SO₃	-	-	-	0,75
Perda ao fogo	40,7	41,05	40,1	35,67

Pode-se observar pequena variação entre a composição química desses resíduos, no entanto, todos são constituídos basicamente de óxido de cálcio (CaO).

A maioria das empresas de produção de celulose dão maior atenção aos setores de produção e manutenção, e pouca atenção ao setor de resíduos sólidos. Essa atenção só é dada quando o espaço físico disponível para a disposição está próximo de ser totalmente ocupado, ou seja, ao invés de prevenir, muitas empresas escolhem remediar os problemas relativos aos resíduos. Por isso, o emprego e a utilização desses resíduos na produção de novos materiais e em diferentes aplicações tende a ser uma alternativa de grande interesse.

A incorporação desses resíduos para a produção de novos materiais é uma estratégia inovadora e apresenta vantagens ambientais quando comparadas ao gerenciamento atual desses resíduos, visto que seu destino final, na maioria das vezes, são aterros sanitários.

2.3 Trabalhos relacionados

Modolo *et al.* (2014) avaliaram a influência, tanto nas propriedades frescas como nas endurecidas, da substituição parcial do cimento por lama de cal na produção de argamassas. A massa seca de cimento foi substituída por lama de cal em teores de 0, 10, 20 e 30%. A tensão de escoamento foi o parâmetro reológico que sofreu maior influência com a incorporação da lama de cal, visto que aumentou à medida que o teor do resíduo aumentou. Enquanto que a viscosidade plástica não teve alteração perceptível após os primeiros 10 minutos de ensaio, o aumento da quantidade de lama de cal fez diminuir o espalhamento das argamassas, com redução de aproximadamente 15% em relação à referência nas argamassas contendo 30% de resíduo. Essa redução da plasticidade pode estar relacionada à coesividade e ao elevado atrito entre as partículas. A resistência mecânica das argamassas foi medida aos 7, 28 e 90 dias e não apresentou diferenças significativas entre todas as composições avaliadas. A capilaridade das argamassas foi medida por um período de 90 minutos. Quanto maior o teor de lama de cal nas argamassas, menor o coeficiente de capilaridade, fenômeno atribuído ao efeito fíler da lama de cal, ou seja, preenchimento de vazios capilares na matriz cimentícia.

Mymrin *et al.* (2020) estudaram a possibilidade de produzir compósitos utilizando a mistura de resíduos da produção de papel e celulose (dregs, grits e lama de cal), resíduos de concreto e resíduos da produção de cal, variando-os em proporções de 55 a 75%, de 10 a 25% e de 0 a 25%, respectivamente. A mistura contendo 15% de dregs, 20% de grits, 20% de lama de cal, 20% de resíduo de concreto e 25% de resíduo da produção de cal foi a que apresentou resistência à compressão axial mais elevada, atingindo 4,81 MPa aos 3 dias, 5,97 MPa aos 28 dias, 8,75 MPa aos 180 dias e 9,61 MPa aos 365 dias. Os compósitos apresentaram valores elevados de resistência à água e baixa retração linear. As propriedades mecânicas exigidas pelas normas brasileiras foram alcançadas para todas as argamassas. O coeficiente de resistência à água (C_{WR}) foi calculado de acordo com a Equação 2.5 (ABNT NBR 9778, 2009).

$$C_{WR} = \frac{R_W}{R_D} \quad 2.5$$

sendo R_W é a resistência à compressão uniaxial dos corpos de prova após 24 horas submersos em água e R_D é a resistência à compressão uniaxial depois de 24 horas ao ar livre.

Azevedo *et al.* (2018) analisaram a sustentabilidade da incorporação de lodo primário de indústrias de papel e celulose em argamassas cimentícias em teores de 5, 10, 15 e 20%. Os resultados mostraram que, para aplicação em argamassas de revestimentos de paredes e tetos, o grau de incorporação não deve ultrapassar 10%, pois maiores teores resultaram em valores de resistência mecânica abaixo dos exigidos por norma. Este comportamento foi, provavelmente, relacionado ao baixo calor de hidratação do material, deixando as reações lentas. Por outro lado, teores mais elevados de lodo residual, acima de 10%, são adequados para argamassas utilizadas no preenchimento de pequenos reparos em alvenarias que não requeiram controle das propriedades. Além disso, as misturas com até 10% de lodo residual mostraram que tanto os parâmetros de retenção de água como de ar incorporado estão dentro dos limites recomendados. A substituição da cal por lodo residual nessas argamassas demonstrou viabilidade ambiental, de acordo com os ensaios de solubilização, visto que os resultados obtidos encontraram-se dentro dos limites aceitáveis pela legislação pertinente, justificando a classificação desse resíduo como não perigoso e atóxico.

Borinaga-Treviño *et al.* (2021) avaliaram a influência do uso da lama de cal como substituta parcial do cimento em argamassas autoadensáveis para pisos. Foi adotada uma argamassa de referência com traço 1:3 (cimento:areia) para ser comparada com substituições em teores de 10, 20, 30 e 40%. A adição de lama de cal diminuiu a condutividade térmica em até 15% para a argamassa com 40% de cimento substituído em relação à referência. Quanto maior o teor de lama de cal na mistura, menor foi a capacidade de calor volumétrica das argamassas. A velocidade do pulso ultrassônico foi reduzida com o aumento da lama de cal, o que foi atribuído à porosidade elevada das argamassas resultantes. O aumento da porosidade causado pela maior proporção de água também foi responsável pelas reduções da condutividade térmica e da capacidade de calor volumétrica. Com relação às propriedades mecânicas, as resistências à flexão e à compressão foram reduzidas em até 50 e 59%, respectivamente. No entanto, as argamassas com substituição de até 20% atingiram a resistência mínima necessária imposta por norma. Por fim,

foram feitas duas lajes distintas: uma com argamassa de referência e outra com argamassa com 20% de substituição. Notou-se aumento médio de temperatura superficial semelhante em ambos os casos. No entanto, a uniformidade da temperatura na superfície foi 12,9% melhor neste último caso.

Malaiškienė *et al.* (2019) analisaram o impacto da lama de cal seca a 75°C na hidratação do cimento. Para comparar com a argamassa de referência, foram realizadas substituições de cimento pela lama de cal em teores de 5, 10 e 15%. Os testes calorimétricos mostraram que a lama de cal praticamente não afeta a taxa de liberação de calor durante a fase I da hidratação. No entanto, estende o período de indução e retarda consideravelmente o tempo de liberação de calor secundário. Os corpos de prova sem a lama de cal obtiveram a liberação de calor total mais elevada. As análises microestruturais mostraram que a lama de cal possui boa aderência à matriz de cimento e atua como ponto de cristalização. A resistência à compressão das argamassas com lama de cal foi menor no estágio inicial de endurecimento; entretanto, à medida que a idade dos corpos de prova aumentou, a diferença entre as resistências diminuiu. Os melhores resultados foram obtidos para a argamassa com 5% de substituição. Como o processo de hidratação do cimento fica razoavelmente retardado, essa argamassa pode ser útil para obras durante estações quentes ou em zonas de clima quente, bem como em obras de grandes dimensões que requeiram baixas liberações de calor.

Azevedo *et al.* (2020) avaliaram a incorporação do lodo primário da indústria de papel e celulose, ainda no estado líquido, em argamassas de cimento e cal. Esse procedimento foi comparado com a incorporação do resíduo no estado seco, que resulta do processo tradicional de beneficiamento com a secagem do resíduo. O tempo necessário para o processamento do lodo primário ainda líquido foi de 22 minutos, enquanto o processo a seco foi de 76 horas. Essa economia representa redução de mais de 99% no tempo gasto, o que influenciaria no custo final das argamassas. Foram avaliados dois procedimentos de incorporação do lodo, correspondendo a um líquido fino e a um líquido grosso. As principais propriedades tecnológicas nos estados fresco e endurecido apresentaram resultados satisfatórios no desempenho das argamassas quando o lodo primário foi utilizado como mistura fina, com valores semelhantes aos da argamassa de referência. O teor de ar incorporado foi de 12% e a retenção de água de 96,8% no estado fresco. No estado

endurecido, essa mesma argamassa apresentou densidade de massa de 1,76 g/cm³, coeficiente capilar de 20,73 g/dm².min^{1/2} e resistência à compressão de 3,7 MPa e resistência à flexão de 1,1 MPa.

Malaiskiene *et al.* (2018) avaliaram o impacto do lodo primário da produção de papel e celulose nas propriedades de pastas e argamassas de cimento. Foram produzidos corpos de prova com a fração fina do lodo primário, substituindo parte do cimento em teores de 5, 10, 15 e 20%. Além disso, também foram produzidos corpos de prova com a fração grossa do lodo primário, mas nestes a areia é que foi substituída parcialmente. A fração fina (fração 0/0,63) compreende o material passante na peneira de abertura 0,63 mm e depositado no fundo. Já a fração grossa (fração 2/4) compreende o material passante na peneira de abertura 4 mm e retido na de 2 mm. Verificou-se que o lodo primário retardou os processos de hidratação e reduziu a liberação de calor. As argamassas com substituição de 5% de cimento apresentaram as melhores resistências aos 28 dias: 5 MPa na flexão e 19 MPa na compressão. Teores acima de 15% impactaram negativamente as propriedades da argamassa, reduzindo significativamente a resistência. Ademais, observou-se que quanto maior o teor de lodo primário, tanto a quantidade quanto o diâmetro dos poros aumentaram.

Vashistha e Kumar (2020) avaliaram a substituição parcial do cimento por lama de cal como recebida e pós-calcinação na confecção de argamassas. A calcinação da lama de cal foi realizada sob temperatura relativamente baixa, entre 650 a 750°C, que representa consumo energético menor do que no processo industrial de calcinação ordinário de obtenção da cal. As substituições parciais do cimento por lama de cal foram em teores de 0, 10, 20, 30 e 40%, em massa. Todas as argamassas produzidas foram ensaiadas à compressão. A resistência à compressão foi satisfatória somente para a argamassa com 10% de lama de cal não calcinada (como recebida) em relação à argamassa de referência. Já as argamassas com lama de cal calcinada, a resistência à compressão foi satisfatória para teores de substituição de até 30% em relação à argamassa de referência. Os resultados superiores das argamassas com lama de cal calcinada foram atribuídos ao aumento da reatividade do resíduo em relação ao não calcinado (como recebido).

A revisão bibliográfica proporcionou visão abrangente sobre o assunto e, com base na literatura, permitiu traçar nova linha de estudo não contemplada por outros

pesquisadores até então. Desta forma, o estudo de diferentes perspectivas metodológicas contribuiu com o planejamento do presente trabalho, bem como na interpretação dos resultados obtidos.

Ante o exposto, verifica-se que os estudos disponíveis na literatura, na maioria dos casos, avaliaram a substituição do cimento por lama de cal e tal substituição foi feita em baixos teores. Além disso, verifica-se que não existem, até então, estudos substituindo, parcial ou totalmente, a cal hidratada por lama de cal na confecção de argamassas, sendo esse o diferencial da presente pesquisa. Assim, vislumbrou-se que essa substituição pudesse ser viável, devido à composição química desse resíduo.

3. MATERIAIS

Este capítulo apresenta as propriedades físicas e químicas das matérias-primas utilizadas na confecção das argamassas (cimento Portland CP II-F 32, cal hidratada CH-III, lama de cal, areia e água), bem como a metodologia dos ensaios adotados para caracterizá-las.

3.1 Cimento Portland CP-II-F 32

Segundo a ABNT NBR 16697 (2018), os cimentos CP II são ditos compostos porque, além da sua composição básica (clínquer + gesso), contêm adição de outro mineral. Eles se diferenciam quanto ao tipo e proporção de adições minerais usadas na sua produção, a saber:

- CP-II-E, cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno;
- CP I-F, cimento Portland composto com fíler;
- CP-II-Z, cimento Portland composto com pozolana.

O CP-II-F pode ser selecionado para diversas aplicações; por isso, é um dos cimentos mais usados no Brasil. Tem adição de fíler calcário entre 6 e 10%. Suas propriedades atendem desde estruturas de concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento. No entanto, não é o mais indicado para aplicação em ambientes muito agressivos.

Assim sendo, neste trabalho foi utilizado o cimento Portland CP II-F 32 da marca Mauá, pertencente ao grupo LafargeHolcim®, com resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias.

3.2 Cal hidratada CH-III

Segundo a ABNT NBR 7175 (2003), norma que regulariza os tipos de cal hidratada para utilização em argamassas, a cal hidratada é definida como um material pulverulento obtido após a hidratação da cal virgem, sendo constituída principalmente de hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$, mas também pode conter hidróxido de magnésio ou óxido de magnésio. Mineralogicamente, a cal hidratada é composta essencialmente por portlandita (CHO *et al.*, 2017).

A norma divide as cales em três grupos: CH-I, CH-II e CH-III. Nessa divisão, a CH-I é considerada a cal hidratada mais pura e mais nobre e a CH-III justamente o oposto. O grau de pureza impacta tanto o preço final como o desempenho da argamassa que contém esse aglomerante: quanto menor a pureza, mais barata é a argamassa e piores serão suas propriedades ligantes.

Assim sendo, neste trabalho foi utilizada a cal hidratada CH-III da marca Itabira, por ser a mais utilizada na região Norte Fluminense.

3.3 Lama de cal

A lama de cal utilizada nessa pesquisa foi fornecida pela empresa de celulose nipo-brasileira CENIBRA®, situada no município de Belo Oriente-MG. Após recebida, foi colocada em estufa para secagem a 100°C por 24 horas, a fim de eliminar a umidade, cujo valor aferido foi 14,9%. Em seguida, com o objetivo de reduzir as impurezas e adequar o tamanho de partículas ao da cal hidratada, aproveitou-se o material passante na peneira n.º 200 (malha com abertura igual a 75 µm). Esse ajuste foi necessário para evitar que a distribuição granulométrica, eventualmente, fosse um parâmetro a mais influenciando nas propriedades do produto final.

3.3.1 Granulometria a laser

A distribuição granulométrica da lama de cal e da cal hidratada foi obtida por meio do ensaio de difração a laser, realizado no Laboratório de Ciências Ambientais (LCA) da UENF, em um equipamento Shimadzu SALD-3101. Inicialmente, as amostras foram dispersas em água destilada. Em seguida, o ensaio foi realizado nas seguintes condições: agitação a 1500 rpm, tempo de ultrassom de 300 segundos, obscuração de 19/0 (19%) e tempo de dispersão de 5 minutos. A Figura 7 compara a distribuição granulométrica da cal hidratada e da lama de cal.

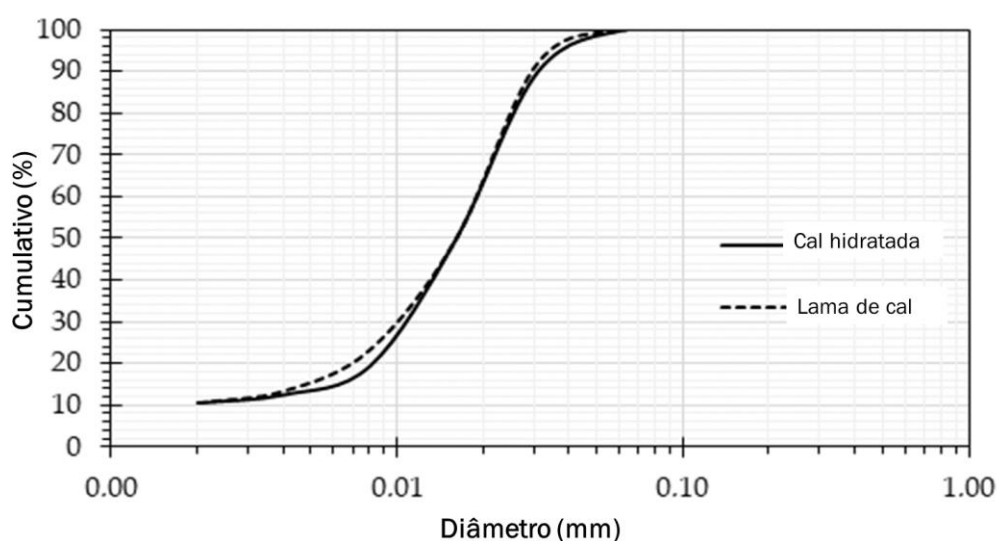


Figura 7: Distribuição granulométrica por difração a laser da cal hidratada e da lama de cal.

3.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise por microscopia eletrônica de varredura é uma técnica analítica que possibilita a identificação das características morfológicas de materiais sólidos. As micrografias da lama de cal foram obtidas por meio do uso de um microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu, modelo Superscan SSX-550, disponível no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF. Em geral, a microestrutura da lama de cal é composta por partículas cristalinas cúbicas (Figura 8), características da calcita (MYMRIN *et al.*, 2020), resultado corroborado na análise de difração de raios X (Figura 10).

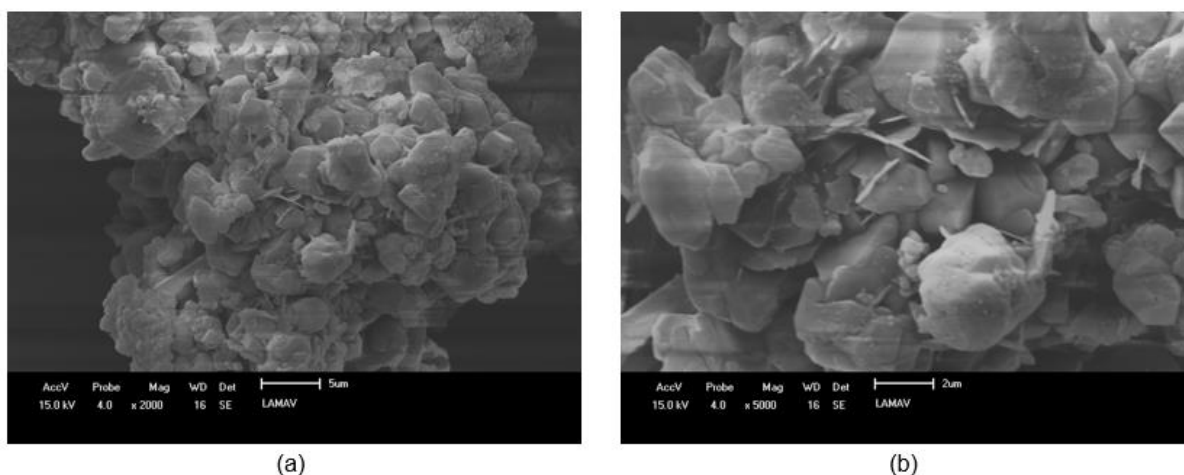


Figura 8 : Micrografias da lama de cal: a) aumento de 2000x; b) aumento de 5000x

3.3.3 Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X permite a verificação das fases cristalinas dos materiais. Esse ensaio foi realizado em um difratômetro MiniFlex 600 da marca Rigaku (Figura 9), disponível no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF, operando com tensão de 40 kV, corrente de 15 mA, radiação Cu-K α com passo $2\theta = 0,05^\circ$, velocidade de varredura de $15^\circ/\text{min}$, num intervalo de medida entre os ângulos de Bragg (2θ) de 8 a 70° .



Figura 9: Difratômetro de raios X modelo MiniFlex 600, da marca Rigaku

Para identificar as fases cristalinas foi realizada uma comparação com os picos de difração de estruturas cristalinas inorgânicas registradas no banco de dados do *software* PDLX 2.0 da Rigaku. A única fase cristalina identificada na lama de cal foi a calcita (CaCO_3), conforme mostra a Figura 10.

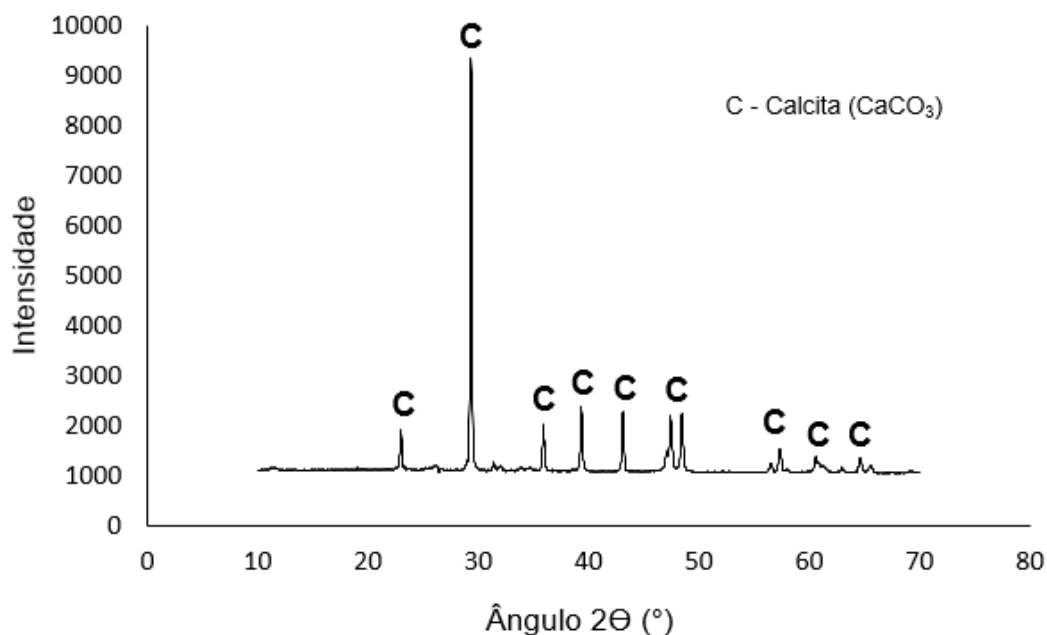


Figura 10: Difratograma de raios X da lama de cal.

3.3.4 Termogravimetria e sua diferencial (TG e DTG)

A termogravimetria é uma técnica analítica que possibilita identificar a variação de massa de uma amostra de acordo com a temperatura ou tempo num ambiente com condições térmicas e atmosféricas controladas. A análise termogravimétrica (TG) foi realizada no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF em um equipamento TGA Q5000 da TA Instruments (Figura 11). Durante o ensaio, a amostra de lama de cal foi submetida à taxa de aquecimento de 15°C/min em ambiente de oxigênio, até a temperatura de 1000°C.



Figura 11: Equipamento para análise termogravimétrica

A curva termogravimétrica da lama de cal e sua diferencial são mostradas na Figura 12. Observa-se um pico endotérmico a aproximadamente 730°C juntamente com perda de massa de aproximadamente 42%. Esse fenômeno está relacionado à liberação de CO₂ durante o aquecimento da amostra, decorrente da reação de decomposição do carbonato de cálcio existente na lama de cal (Figura 10), conforme mostra a Equação 3.1.

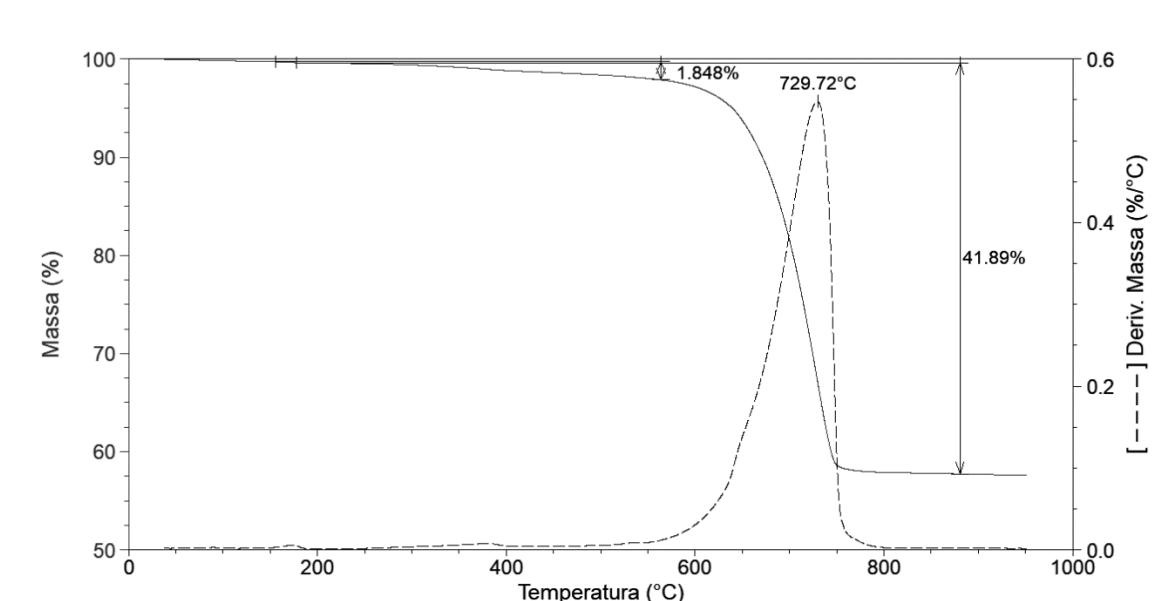


Figura 12: Curvas TG e DTG da lama de cal.

3.4 Areia

Como agregado miúdo foi utilizada areia proveniente do rio Paraíba do Sul, na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ. Primeiramente, a areia foi lavada para reduzir as impurezas que porventura poderiam estar presentes. Em seguida, foi colocada em estufa para secagem a 100°C por 24 horas. Posteriormente foi peneirada e aproveitou-se todo o material passante na peneira ABNT 14 (1,18 mm). A fim de caracterizar o material foram realizados os procedimentos da ABNT NBR NM 248 (2003) e a massa específica foi determinada por picnometria (ABNT NBR 6457, 2016). A Tabela 4 mostra os resultados da caracterização do agregado miúdo.

Tabela 4: Caracterização da areia.

Massa específica (g/cm ³)	2,58
Módulo de finura	2,24
Diâmetro máximo (mm)	1,18

Como o módulo de finura foi menor do que 2,4, essa areia é classificada como areia fina. A Figura 13 mostra a distribuição granulométrica do agregado miúdo.

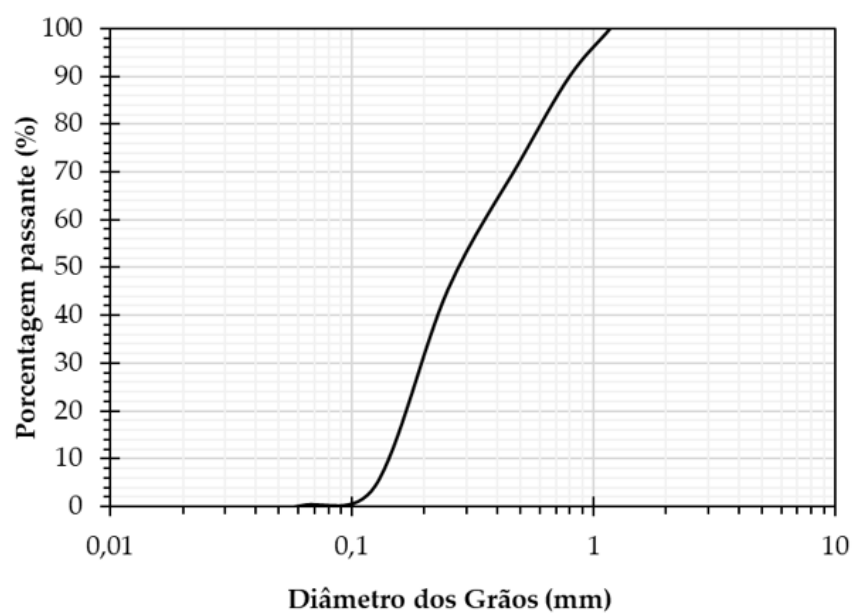


Figura 13: Distribuição granulométrica da areia.

3.5 Água

Foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ, tratada pela empresa Águas do Paraíba.

3.6 Massa específica real

A massa específica real das matérias-primas, exceto a da areia, foi determinada com o auxílio do frasco volumétrico de Le Chatelier, por meio do procedimento definido na ABNT NBR NM 23 (2000). Este método fixa o modo pelo

qual se determina a massa específica real de materiais finamente pulverulentos, tais como cimento, gesso, cal, dentre outros.

Inicialmente, colocou-se querosene no frasco Le Chatelier, com auxílio de um funil de haste longa, até que o nível superior do líquido ficasse entre as graduações 0 e 1 ml. Em seguida, as paredes internas do frasco acima do líquido foram secas com papel absorvente. Na sequência, o frasco foi submetido a um banho termorregulador por 30 minutos, para que fosse atingido o equilíbrio térmico (Figura 14).



Figura 14: Frasco Le Chatelier em banho termorregulador.

Passados os 30 minutos, retirou-se o frasco do banho e efetuou-se a leitura inicial V_1 . Com o auxílio de um funil de haste curta, foram adicionados ao frasco, em pequenas proporções, cerca de 60 g da matéria-prima para provocar o deslocamento do líquido até o intervalo de 18 e 24 ml. Nessa etapa, é necessário cuidar para que o líquido não ultrapasse a faixa superior da graduação do frasco e para que a matéria-prima não adira às paredes internas acima do nível do líquido. Terminada essa etapa, o frasco foi submetido a movimentos pendulares até eliminar as bolhas de ar presentes no sistema. Finalmente, com o frasco na posição vertical, efetuou-se a leitura final V_2 .

A diferença entre a leitura final e a inicial representa o volume do líquido deslocado pela matéria-prima adicionada. Dessa forma, a massa específica real foi calculada utilizando-se a Equação 3.2.

$$\gamma = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad 3.2$$

onde γ é a massa específica real, em g/cm³, m é a massa do material adicionado, em g, V₂ é a leitura final do volume do líquido, em ml, e V₁ é a leitura inicial do volume do líquido, em ml. A Tabela 5 mostra a massa específica real de cada matéria-prima analisada.

Tabela 5: Massa específica real das matérias-primas.

Massa específica real (g/cm ³)		
CP II-F 32	CH-III	Lama de cal
2,99	2,69	2,64

3.7 Composição química

A caracterização química do cimento, da cal hidratada e da lama de cal foi obtida por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX) em um equipamento Shimadzu EDX-700 (Figura 15), com tubo de 3 kW e alvo de ródio, pertencente ao Laboratório de Engenharia Civil da UENF (LECIV). Por meio desse ensaio, foi possível obter as análises qualitativa e quantitativa da composição química das matérias-primas utilizadas nesta pesquisa, como mostra a Tabela 6.



Figura 15: Espectrômetro de fluorescência de raios X.

Tabela 6: Composição química das matérias-primas (% em peso).

Óxido	CP II-F 32	CH-III	Lama de cal
CaO	82,740	95,520	97,787
Fe₂O₃	2,933	-	0,049
K₂O	0,564	1,209	1,295
SrO	0,171	0,037	0,205
ZrO₂	0,017	-	0.008
SO₃	2,683	0,636	0,656
SiO₂	10,471	2,597	-
MnO	0,103	-	-
TiO₂	0,317	-	-

Observa-se que a lama de cal é composta por aproximadamente 98% de CaO, relativo ao processo de caustificação na fase de recuperação química do licor branco. Os outros óxidos, identificados em menores quantidades, são remanescentes do processo de polpação química. Além disso, nota-se que a porcentagem de CaO presente na lama de cal é ligeiramente superior ao da cal hidratada. No entanto, vale destacar que o CaO identificado na lama de cal está relacionado ao CaCO₃, conforme mostra a Figura 10. Já na cal hidratada, o CaO indicado está presente na forma de Ca(OH)₂.

Cumprindo ainda salientar que o nome do resíduo estudado nesta pesquisa induz a uma associação errônea à cal reativa, quando, na verdade, a lama de cal é formada predominante por calcário propriamente dito, ou seja, um material inerte. Esse comportamento foi confirmado ao analisar o índice de atividade pozolânica (IAP) da lama de cal conforme a ABNT NBR 5752 (2014), pois o valor encontrado foi de 57%, o que indica baixo conteúdo amorfo ou reativo, uma vez que deveria atingir no mínimo 75% para ser considerado como material pozolânico, segundo os requisitos prescritos na ABNT NBR 12653 (2015).

4. MÉTODOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A pesquisa teve início com a caracterização química e física das matérias-primas, conforme abordado no Capítulo 3. Optou-se pela dosagem, em massa, de 1:1:5 (cimento:cal:areia) para a produção das argamassas, por ser muito utilizada e satisfazer as exigências em construções de pequeno porte. De posse dessas informações, calculou-se a quantidade de cada material para o ensaio de consistência (*flow table test*), a fim de determinar a quantidade de água adequada para cada argamassa. Foram avaliadas 5 dosagens diferentes, variando-se o teor de substituição da cal hidratada por lama de cal, em massa, de 0 a 100%, a cada 25%.

Depois de definida a quantidade de cada material, foram produzidos corpos de prova cilíndricos das 5 dosagens para comparar a resistência à compressão axial, aos 14 e 28 dias, com o objetivo de identificar a argamassa de melhor desempenho mecânico. Em seguida, trabalhou-se apenas com essa argamassa, e suas propriedades foram analisadas por meio de outros ensaios. Fez-se um acompanhamento do ganho de resistência mecânica dessa argamassa nas idades de 1, 3, 7, 14, 21, 28 e 60 dias, por meio dos ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral (*Brazilian test*). Além disso, a viabilidade técnica dessa argamassa foi avaliada segundo os ensaios prescritos na ABNT NBR 13281 (2005). Finalmente, técnicas analíticas, como microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX), calorimetria isotérmica e termogravimetria e sua diferencial (TG/DTG), foram realizadas nas 5 argamassas, para compará-las química, física e morfologicamente e, dessa forma, compreender as causas das diferenças de comportamento mecânico entre elas.

Assim sendo, este capítulo detalha os ensaios e procedimentos utilizados nessa pesquisa, bem como discute os resultados obtidos no programa experimental. Para facilitar a identificação das argamassas com diferentes teores de substituição, utilizou-se a seguinte nomenclatura ao longo do trabalho:

- **LC0**: refere-se à argamassa com 100% de cal hidratada CH-III e 0% de lama de cal;
- **LC25**: refere-se à argamassa com 75% de cal hidratada CH-III e 25% de lama de cal;

- **LC50**: refere-se à argamassa com 50% de cal hidratada CH-III e 50% de lama de cal;
- **LC75**: refere-se à argamassa com 25% de cal hidratada CH-III e 75% de lama de cal;
- **LC100**: refere-se à argamassa com 0% de cal hidratada CH-III e 100% de lama de cal.

4.1 Ensaio de mesa de consistência (*flow table test*)

O ensaio consiste em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada num tronco de cone padrão, por meio de sucessivas quedas da mesa do equipamento. Os ensaios de consistência foram realizados segundo a ABNT NBR 13276 (2016), que recomenda índice de consistência de 260 ± 5 mm. Dessa forma, ao se encontrar o índice recomendado, a quantidade de água a ser adicionada na dosagem é determinada.

Para evitar o desperdício dos materiais, inicialmente foi estimada uma quantidade suficiente para preencher o molde, considerando uma perda de 20%. A fôrma tronco-cônica possui 12,5 cm de diâmetro de base, 8 cm de diâmetro de topo e 6,5 cm de altura. O volume do molde foi calculado de acordo com a Equação 4.1:

$$V = \frac{\pi h}{3} (R^2 + Rr + r^2) \quad 4.1$$

sendo,

V o volume do tronco de cone, em cm³;

R o raio da base, em cm;

r raio do topo, em cm;

h a altura, em cm.

Dessa forma, o volume obtido foi de 544,96 cm³. Considerando 20% de perda, tem-se 653,96 cm³. Com base em valores da literatura (FIORITO, 2009; GUIMARÃES, 2002), a estimativa inicial da relação água/cimento (a/c) foi 1,1. De

posse dessas informações, determinou-se a quantidade de materiais de acordo com a Equação 4.2.

$$V_W + V_C + V_A + V_{CH} = 653,96 \quad 4.2$$

em que,

V_W é o volume de água, em cm^3 ;

V_C é o volume de cimento, em cm^3 ;

V_A é o volume de areia, em cm^3 ;

V_{CH} é o volume de cal hidratada, em cm^3 .

Definidas as quantidades, antes de serem colocadas no misturador, os materiais secos foram pesados e homogeneizados em saco plástico. Somente quando os materiais secos estavam na cuba do misturador é que foi adicionada água à mistura.

Após a mistura, a argamassa foi colocada no molde tronco-cônico posicionado no centro da mesa de consistência. A fôrma foi preenchida com três camadas sucessivas de alturas aproximadamente iguais. Com um soquete padrão, foram aplicados golpes uniformemente distribuídos em cada camada, a saber: 15 golpes na primeira, 10 golpes na segunda e 5 golpes na terceira. Na sequência, a argamassa foi rasada com o auxílio de uma régua metálica e o molde foi retirado. Depois de retirado o molde, a argamassa foi submetida a 30 quedas de uma altura de 14 mm durante 30 segundos.

Em seguida, mediu-se o espalhamento da argamassa com uma régua segundo três direções, como mostra a Figura 16. O índice de consistência corresponde à média dessas três direções.



Figura 16: Espalhamento da argamassa na mesa de consistência.

Como resultado desse ensaio, obteve-se a relação a/c igual a 1,3, atendendo ao índice de consistência recomendado pela norma (260 ± 5 mm), para todas as argamassas. A Tabela 7 mostra a quantidade de cada material nas diferentes argamassas estudadas.

Tabela 7: Quantidade dos materiais utilizados nas 5 argamassas avaliadas.

Argamassa	Cimento (g)	Cal hidratada (g)	Lama de cal (g)	Areia (g)	Água (g)
LC0	165,9	165,9	0	829,6	215,7
LC25	165,9	124,4	41,5	829,6	215,7
LC50	165,9	82,9	82,9	829,6	215,7
LC75	165,9	41,5	124,4	829,6	215,7
LC100	165,9	0	165,9	829,6	215,7

4.2 Determinação da dosagem ótima

Depois de definida a quantidade de cada material das argamassas, a fim de identificar a dosagem de melhor desempenho mecânico, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro para as 5 argamassas (Figura 17), para serem ensaiados à compressão axial aos 14 e 28 dias, conforme a ABNT NBR 5739 (2018). Dessa forma, foram moldados 6 corpos de prova para cada dosagem: 3 para serem rompidos aos 14 dias e 3 para serem rompidos aos 28 dias.

Após 24 horas, foi feita a desmoldagem e a cura foi feita em temperatura ambiente de laboratório a 23°C (Figura 18).



Figura 17: Fôrmas cilíndricas de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro.



Figura 18: Corpos de prova em cura ambiente de laboratório

O ensaio de compressão axial foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV-UENF) numa prensa hidráulica manual da marca SOLOTEST, com capacidade de 1000 kN e velocidade de carregamento de 0,30 MPa/s (Figura 19). Para assegurar a distribuição uniforme de carga na superfície do corpo de prova durante o ensaio, foram dispostos, em cada face deste, pratos metálicos revestidos com discos de neoprene. Esse modo de tratamento superficial dos corpos de prova segue as prescrições da ASTM C 1231 (2000).



Figura 19: Corpo de prova posicionado na prensa para o ensaio de compressão axial.

A resistência à compressão axial foi calculada a partir da Equação 4.3.

$$R_c = \frac{F}{\pi * r^2} \quad 4.3$$

sendo,

R_c a resistência à compressão axial, em MPa;

F a força aplicada pela prensa, em N;

r o raio do corpo de prova, em mm.

A Figura 20 mostra as médias obtidas no ensaio de compressão axial aos 14 e aos 28 dias das 5 argamassas. É possível observar que aos 14 dias a argamassa LC100 obteve o melhor desempenho mecânico (4,6 MPa). No entanto, aos 28 dias, a argamassa que obteve a maior resistência à compressão axial foi a LC25, atingindo 6,4 MPa. Uma vez que diferentes argamassas alcançaram as maiores resistências em idades distintas, foi necessário realizar testes estatísticos para verificar se a diferença entre as médias obtidas era significativa.

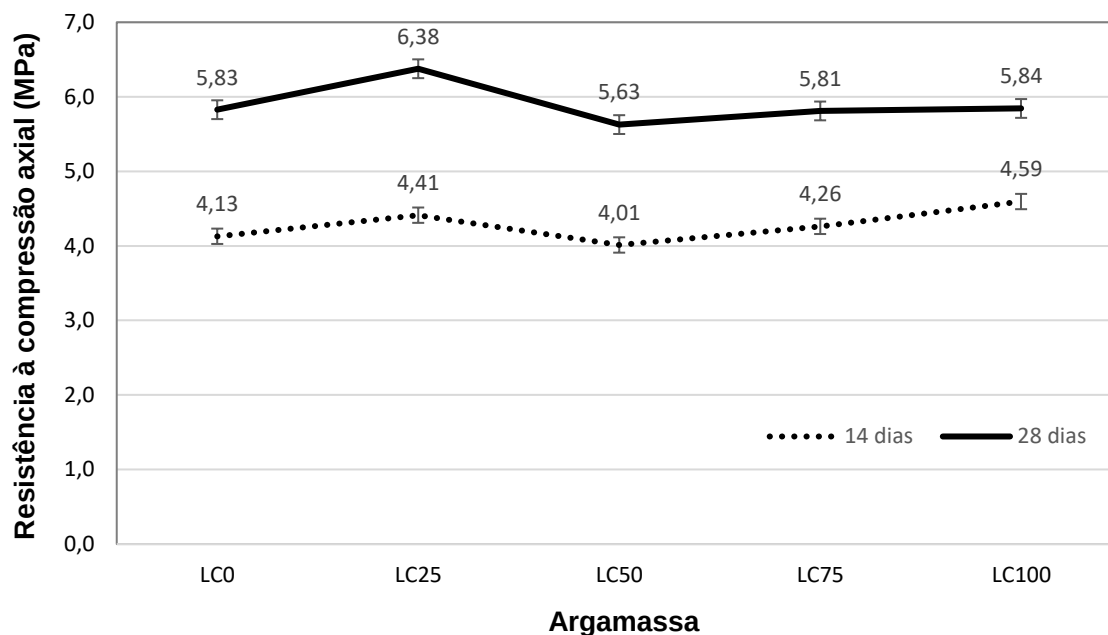


Figura 20: Resistência à compressão axial aos 14 e 28 dias.

4.2.1 Teste de Dunnett

A primeira análise estatística realizada nas amostras foi o teste de Dunnett. Esse teste serve para comparar um tratamento de referência com os demais tratamentos, não havendo interesse na comparação dos demais tratamentos entre si (DUNNETT, 1955). Ou seja, cada tratamento é comparado isoladamente com o tratamento de controle. A aplicação desse teste parte de dois pressupostos:

- 1) os erros ou resíduos devem ser independentes e seguem uma distribuição normal;
- 2) os erros devem apresentar variâncias homogêneas.

Assim, os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resíduos, e ao teste de Barlett para verificar a homogeneidade das variâncias, ao nível de 5% de significância (SHAPIRO e WILK, 1965; BARLETT, 1937). Confirmados os pressupostos, prosseguiu-se com a análise de variância pelo teste F ao nível de significância de 1% de probabilidade. Após identificada a existência de diferenças significativas entre pelo menos um dos tratamentos, as médias foram comparadas, considerando a argamassa LC0 como tratamento de

referência. As análises foram conduzidas com o auxílio do *software* computacional R, pela interface *RStudio* (R Core Team, 2020).

A Tabela 8 mostra a análise de variância (ANOVA) para a resistência à compressão axial aos 14 dias. Nessa idade, o coeficiente de variação entre as amostras foi 3,35%, que é considerado um valor baixo. Isso significa que o erro do experimento pouco influenciou na diferença encontrada entre os valores de resistência das amostras. Dessa forma, essa diferença observada ocorre em detrimento dos diferentes tratamentos utilizados.

Tabela 8: Quadro ANOVA para resistência à compressão axial aos 14 dias.

Quadro de análise de variância				
	GL	SQ	QM	Fc
Tratamento	4	0,63428	0,158570	7,6963
Resíduo	10	0,20603	0,020603	-
Total	14	0,84032	-	-

em que,

GL é o grau de liberdade;

SQ é a soma dos quadrados;

QM é o quadrado médio;

Fc é o fator F calculado.

A Tabela 9 mostra o teste de Dunnett para resistência à compressão axial aos 14 dias. Na coluna Grupo, letras iguais representam médias estatisticamente iguais, ou seja, sem diferença significativa; letras diferentes representam médias estatisticamente diferentes, ou seja, com diferença significativa. Portanto, a resistência à compressão axial das argamassas LC0, LC25, LC50 e LC75 é equivalente. Além disso, cabe destacar que a média da argamassa LC100 foi a maior dentre a média dos outros tratamentos.

Tabela 9: Teste de Dunnett para resistência à compressão axial aos 14 dias.

Tratamento	Média	Grupo
LC100	4,59	b
LC75	4,26	a
LC50	4,01	a
LC25	4,41	a
LC0	4,13	a

A Tabela 10 mostra a ANOVA para a resistência à compressão axial aos 28 dias. Nessa idade, o coeficiente de variação entre as amostras foi 3,16%.

Tabela 10: Quadro ANOVA para resistência à compressão axial aos 28 dias.

Quadro de análise de variância				
	GL	SQ	QM	Fc
Tratamento	4	0,95567	0,238917	6,8918
Resíduo	10	0,34667	0,034667	-
Total	14	1,30233	-	-

Finalmente, a Tabela 11 mostra o teste de Dunnett para a resistência à compressão axial aos 28 dias. Nessa idade, a resistência à compressão axial das argamassas LC0, LC50, LC75 e LC100 é equivalente. Além disso, a média da argamassa LC25 foi a maior dentre a média dos outros tratamentos. Logo, conclui-se que a substituição parcial ou total da cal hidratada pela lama de cal não comprometeu a resistência mecânica do produto final. Pelo contrário, a resistência aumentou ou se manteve inalterada em relação à referência.

Tabela 11: Teste de Dunnett para resistência à compressão axial aos 28 dias.

Tratamento	Média	Grupo
LC25	6,38	b
LC100	5,84	a
LC75	5,81	a
LC50	5,63	a
LC0	5,83	a

4.2.2 Teste de Tukey

A segunda análise estatística realizada nas amostras foi o teste de Tukey. Esse teste utiliza os mesmos pressupostos do teste de Dunnett, conforme item 4.2.1. No entanto, o teste de Tukey é considerado mais refinado, visto que compara a média de todos os tratamentos entre si, diferentemente do teste de Dunnett, que compara as médias apenas com um tratamento de referência (TUKEY, 1949).

A Tabela 12 mostra o teste de Tukey para a resistência à compressão axial aos 14 dias. A interpretação dos resultados obtidos por esse método é mais complexa do que no teste de Dunnett. Observa-se que nessa idade as médias das argamassas LC25, LC75 e LC100 foram estatisticamente iguais entre si. Por outro lado, a média da argamassa LC100 foi superior à das argamassas LC0 e LC50.

Tabela 12: Teste de Tukey para resistência à compressão axial aos 14 dias.

Tratamento	Média	Grupo
LC100	4,59	a
LC25	4,41	ab
LC75	4,26	abc
LC0	4,13	bc
LC50	4,01	c

Por fim, a Tabela 13 mostra o teste de Tukey para a resistência à compressão axial aos 28 dias. Nota-se que as médias das argamassas LC0, LC50, LC75 e LC100 foram estatisticamente iguais e todas foram inferiores à da argamassa LC25.

Tabela 13: Teste de Tukey para resistência à compressão axial aos 28 dias.

Tratamento	Média	Grupo
LC25	6,38	a
LC100	5,84	b
LC75	5,81	b
LC50	5,63	b
LC0	5,83	b

Embora a argamassa LC25 tenha alcançado a maior resistência à compressão axial aos 28 dias dentre todas, com base nos resultados obtidos nos dois testes estatísticos, optou-se pela argamassa LC100 para dar prosseguimento à pesquisa, visto que foi possível substituir 100% da cal hidratada por lama de cal sem comprometer a resistência mecânica do produto final, obtendo-se ainda o melhor resultado ambiental/sustentável, já que diminui a necessidade de extração e calcinação de rochas calcárias para a produção de cal hidratada para a Construção Civil.

Outrossim, vale ressaltar que os valores de resistência à compressão das argamassas foram semelhantes mesmo com diferentes teores de substituição, pois o efeito de preenchimento proporcionado pelo resíduo (efeito *filler*) concorreu de forma semelhante à reatividade da cal hidratada.

4.3 Evolução da resistência mecânica da argamassa LC100

Após seleção da argamassa LC100 para dar seguimento à pesquisa, foi realizada uma análise detalhada do ganho de resistência mecânica em função do tempo, nas idades de 1, 3, 7, 14, 21, 28 e 60 dias.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739, 2018) e à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222, 2011) em 3 corpos de prova cilíndricos com 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro, como mostram, respectivamente, as Figuras 19 e 21.

A resistência à compressão axial foi calculada de acordo com a Equação 4.3. Para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral utilizou-se a Equação 4.4.

$$R_T = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad 4.4$$

em que,

R_T é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F é a carga de ruptura, em N;

D é o diâmetro do corpo de prova, em mm;

L é o comprimento do corpo de prova, em mm.

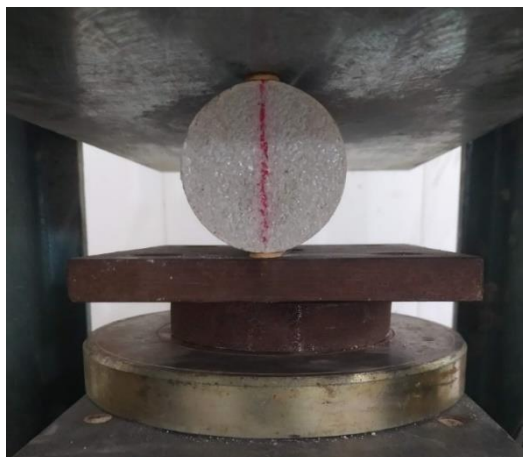


Figura 21: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A Figura 22 mostra o ganho de resistência mecânica da argamassa LC100 ao longo dos dias. Em relação à resistência à compressão axial, observa-se que o ganho de resistência mais acentuado ocorre até o sétimo dia, seguido por um aumento relativamente uniforme até os 28 dias. No terceiro e no sétimo dia a argamassa atingiu resistência à compressão axial igual a 50 e 68%, respectivamente, em relação à registrada aos 28 dias. Além disso, observa-se que a partir dos 28 dias, a resistência da argamassa permaneceu praticamente inalterada.

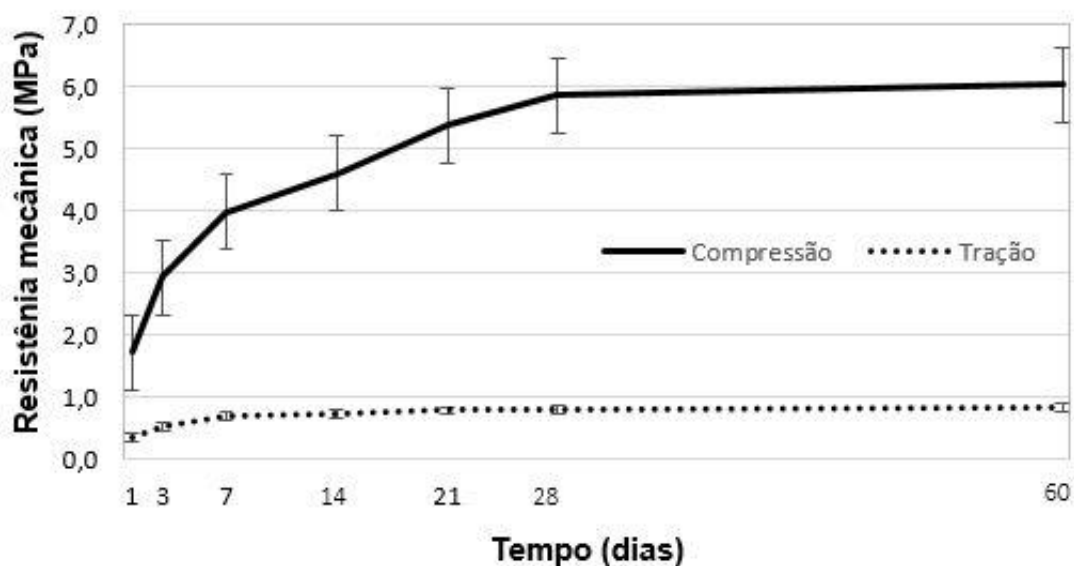


Figura 22: Evolução da resistência mecânica da argamassa LC100 em função do tempo.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral, houve aumento mais expressivo até os 14 dias. Assim como na resistência à compressão, a partir dos 28 dias o valor da resistência permaneceu praticamente inalterado, mostrando

novamente que a máxima resistência é alcançada nessa idade. Aos 28 dias, a resistência à tração por compressão diametral atingiu 0,8 MPa, o que representa aproximadamente 14% da resistência à compressão nessa mesma idade.

4.4 Avaliação da viabilidade tecnológica da argamassa LC100

Com o intuito de obter mais características acerca da argamassa LC100, foram realizados os ensaios prescritos pela ABNT NBR 13281 (2005). Esta norma traz os requisitos exigidos para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Tais requisitos possibilitam a classificação das argamassas e a avaliação de sua viabilidade tecnológica.

4.4.1 Densidade de massa no estado fresco

A densidade de massa no estado fresco foi determinada de acordo com a ABNT NBR 13278 (2005). Para realizar esse ensaio foi utilizado um recipiente metálico da marca SOLOTEST com 400 cm³ de volume, que foi verificado pela Equação 4.5.

$$V_r = \frac{M_t - M_r}{\rho_a} \quad 4.5$$

sendo,

V_r o volume do recipiente, em cm³;

M_t a massa do recipiente totalmente cheio de água, em g;

M_r a massa do recipiente vazio, em g;

ρ_a a densidade da água destilada, igual a 1,0 g/cm³.

Após verificar o volume do recipiente, misturou-se a argamassa de acordo com o procedimento mostrado no item 4.1. O recipiente metálico padronizado foi preenchido com argamassa em 3 camadas de alturas aproximadamente iguais, aplicando-se 20 golpes em cada camada com uma espátula na posição vertical. Em seguida, o recipiente foi submetido a 3 quedas na mesa de adensamento (*flow*

table). Ao final, a superfície do recipiente foi regularizada com auxílio de uma régua metálica (Figura 23) e a massa do conjunto foi medida.

A densidade de massa no estado fresco foi calculada por meio do uso da Equação 4.6.

$$d = \frac{M_c - M_r}{V_r} * 1000 \quad 4.6$$

em que,

d é a densidade de massa no estado fresco, em kg/m³;

M_c é a massa do recipiente com argamassa, em g;

M_r é a massa do recipiente vazio, em g;

V_r é o volume do recipiente, em cm³.



Figura 23: Recipiente metálico, com argamassa, utilizado para determinar a densidade de massa no estado fresco.

A Tabela 14 mostra o resultado do ensaio de densidade de massa no estado fresco e a classificação da argamassa de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005). Pode-se observar que a substituição da cal hidratada por lama de cal resultou numa pequena diminuição da densidade de massa no estado fresco da argamassa, o que está de acordo com a Tabela 5, uma vez que a cal hidratada CH-III possui densidade um pouco maior do que a da lama de cal. Essa diminuição ficou em torno de 2% e não representa prejuízos significativos nessa propriedade.

Tabela 14: Densidade de massa no estado fresco (ABNT NBR 13281, 2005).

Classe	d (kg/m ³) ABNT NBR 13281 (2005)	d _{LC0} (kg/m ³)	d _{LC100} (kg/m ³)
D1	≤ 1400	2047	2004
D2	1200 a 1600		
D3	1400 a 1800		
D4	1600 a 2000		
D5	1800 a 2200		
D6	> 2000		

Ainda de acordo com a Tabela 14, tanto a argamassa LC0 quanto a argamassa LC100 são classificadas como D6. Do ponto de vista mecânico essa é uma característica positiva, pois argamassas dessa classe possuem elevada densidade de massa no estado fresco, o que sugere adequado empacotamento dos grãos e, conseqüentemente, baixo índice de vazios. Em contrapartida, valores baixos de densidade podem indicar muito ar aprisionado no interior da argamassa, prejudicando a resistência mecânica do produto final.

4.4.2 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado foi determinado de acordo com a ABNT NBR NM 47 (2002). Esse ensaio utiliza um recipiente cilíndrico metálico preenchido com argamassa, hermeticamente fechado com tampa, dotado de válvulas de ar e torneiras, indicando num manômetro a pressão necessária para injeção e saída de água da amostra (Figura 24).

O recipiente foi preenchido em três camadas, compactando-as manualmente com 25 golpes cada uma, por meio do uso de uma haste padrão. Em seguida, rasou-se a superfície da argamassa e a tampa foi colocada de forma que a água fosse injetada em uma das torneiras até sua saída pelo lado oposto. Uma vez fechadas as torneiras e válvulas, o ar foi injetado com auxílio de uma bomba manual até a pressão atingir o valor inicialmente indicado no manômetro, permitindo a leitura direta do teor de ar incorporado.



Figura 24: Recipiente para ensaio de teor de ar incorporado.

A Tabela 15 mostra o resultado do ensaio de teor de ar incorporado nas argamassas LC0 e LC100.

Tabela 15: Teor de ar incorporado.

Argamassa	Teor de ar incorporado (%)
LC0	8
LC100	10

Nota-se que a substituição total da cal hidratada por lama de cal na argamassa provocou pequeno aumento de 2% no teor de ar incorporado. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) recomenda que o teor de ar incorporado esteja entre 7 e 17% para garantir condições adequadas na aplicação da argamassa. Portanto, observa-se que tanto a argamassa LC0 como a LC100 apresentam valores dentro do intervalo recomendado.

Segundo Malaiskiene *et al.* (2018), tanto o teor de ar incorporado quanto a retenção de água são propriedades que influenciam diretamente a trabalhabilidade e, conseqüentemente, a viabilidade do uso dessas argamassas. O excesso de ar incorporado pode causar problemas de durabilidade em materiais cimentícios devido à elevada porosidade da matriz, facilitando a entrada de CO₂, bem como de outros agentes agressivos, caso esses poros estejam interconectados. Esses gases podem reagir com a pasta cimentícia e provocar o enfraquecimento do produto final (MARTINS *et al.*, 2018).

4.4.3 Retenção de água

A retenção de água foi determinada de acordo com a ABNT NBR 13277 (2005). Para a realização do ensaio foi utilizado um funil de Buchner modificado com abertura de 200 mm, acoplado à uma bomba de vácuo para aplicar sucção na argamassa (Figura 25).

Inicialmente, um prato contendo um papel filtro umedecido foi colocado sobre o funil de ensaio para garantir a estanqueidade entre eles. Com a torneira fechada, a bomba de vácuo foi acionada até que uma sucção de 51 mm de mercúrio fosse aplicada ao sistema. Em seguida, a torneira foi aberta durante 90 segundos para retirar o excesso de água do papel filtro. A massa do conjunto prato-papel filtro úmido foi medida (m_v).



Figura 25: Dispositivo para ensaio de retenção de água.

Na sequência, preencheu-se o prato com a argamassa e 16 golpes foram aplicados uniformemente junto à borda e 21 golpes foram uniformemente distribuídos na região central, para garantir um preenchimento homogêneo do prato. Com movimentos do centro do prato para a borda, o excesso de argamassa foi removido com o auxílio de uma régua metálica, até a obtenção de uma superfície plana. A massa do conjunto com a argamassa rasada foi medida (m_a). Cabe ressaltar que o prato que compõe o conjunto tem 20 mm de espessura e, ao ser

preenchido com argamassa, simula a espessura de revestimentos de paredes e tetos.

Em seguida, a torneira que controla a sucção foi aberta novamente e aplicou-se uma sucção à amostra de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos. Após esse procedimento, o prato foi retirado do funil e a massa do conjunto foi medida (m_s), podendo a retenção de água (R_a) ser calculada por meio do uso da Equação 4.7.

$$R_a = \left[1 - \frac{m_a - m_s}{AF * (m_a - m_v)} \right] * 100 \quad 4.7$$

sendo AF o fator água/argamassa fresca determinado pela Equação 4.8.

$$AF = \frac{m_w}{m + m_w} \quad 4.8$$

em que,

m_a é a massa do conjunto com argamassa, em g;

m_s é a massa do conjunto após a sucção, em g;

m_v é a massa do conjunto vazio, em g;

m_w é a massa total de água acrescentada à mistura, em g;

m é a soma das massas dos componentes anidros, em g.

A Tabela 16 mostra o resultado do ensaio de retenção de água e a classificação da argamassa de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005). De acordo com essa tabela, a argamassa LC100 é classificada como U6, indicando elevada capacidade de retenção de água. Pode-se observar que a substituição da cal hidratada por lama de cal provocou aumento de 4% na retenção de água da argamassa. Azevedo *et al.* (2020) obteve aumento de 3,6% na retenção de água ao substituir 10% de CH-III por lodo primário da indústria de papel e celulose. Esse aumento foi atribuído à presença de celulose no resíduo, uma vez que este material pode provocar a formação de componentes reativos que favorecem a retenção de água (MARLIERE *et al.*, 2012).

Tabela 16: Retenção de água (ABNT NBR 13281, 2005).

Classe	R _a (%) ABNT NBR 13281 (2005)	R _{a-LC0} (%)	R _{a-LC100} (%)
U1	≤ 78	94	98
U2	72 a 85		
U3	80 a 90		
U4	86 a 94		
U5	91 a 97		
U6	95 a 100		

Essa característica é favorável, pois quanto maior a retenção de água, melhor a condição de aplicação, visto que a presença de água permite que as reações de endurecimento da argamassa sejam mais gradativas, promovendo a correta hidratação do cimento e o ganho de resistência do material. Caso contrário, a rápida perda de água da argamassa para o substrato, sobre o qual será aplicada, pode provocar pequenas rachaduras no material, comprometendo a resistência mecânica da argamassa e o aspecto estético da parede (MATTANA *et al.*, 2012).

4.4.4 Densidade de massa aparente no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido seguiu a metodologia da ABNT NBR 13280 (2005). Para a realização do ensaio foram confeccionados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura e comprimento, respectivamente), conforme mostra a Figura 26. Os corpos de prova foram moldados em duas camadas, sendo em cada camada aplicadas 30 quedas na mesa de adensamento.

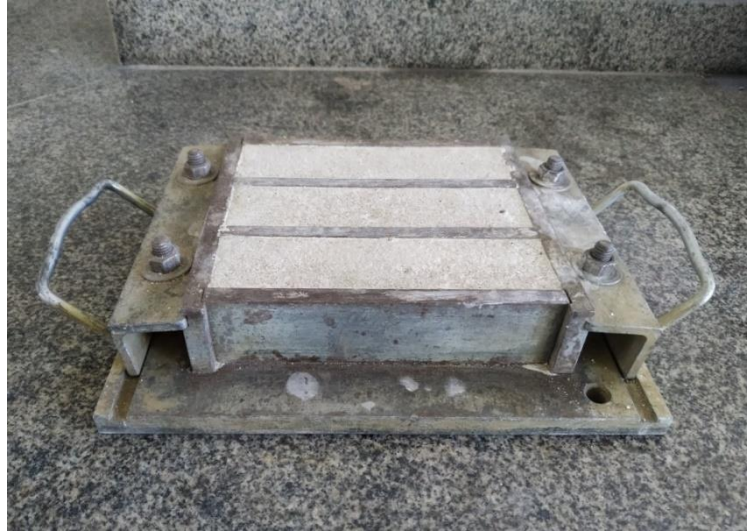


Figura 26: Corpos de prova para determinação da densidade de massa no estado endurecido.

Após 28 dias de cura, aferiu-se, com o auxílio de um paquímetro, a altura, a largura e o comprimento dos corpos de prova. Vale ressaltar que essas medidas foram obtidas em duas ou mais posições distintas para cada dimensão. Em seguida, as massas dos corpos de prova foram determinadas utilizando-se uma balança de laboratório com precisão de 0,1 g.

De posse desses dados, calculou-se a densidade de massa aparente média no estado endurecido por meio do uso da Equação 4.9.

$$\rho_{ap} = 1000 * \frac{m}{l * c * h} \quad 4.9$$

sendo,

ρ_{ap} a densidade de massa aparente no estado endurecido, em kg/m³;

m a média da massa dos corpos de prova, em g;

l a média da largura dos corpos de prova, em cm;

c a média do comprimento dos corpos de prova em cm;

h a média da altura dos corpos de prova, em cm.

A Tabela 17 mostra os resultados do ensaio de densidade de massa aparente e a classificação da argamassa de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005). Verifica-se que, tanto a LC0 quanto a LC100, são classificadas como M5, possuindo alta densidade de massa aparente no estado endurecido. As reduções na densidade de

massa no estado endurecido em relação à densidade de massa no estado fresco foram de aproximadamente 9 e 10% para a LC0 e LC100, respectivamente. Essas diferenças são explicadas, principalmente, pela perda de água por secagem durante a cura dos corpos de prova.

Segundo Costa (2006), argamassas à base de cimento Portland têm sua densidade reduzida de 3 a 11% quando curadas à temperatura ambiente. Dessa forma, nota-se que ambas as argamassas se apresentaram dentro dos limites de argamassas convencionais.

Tabela 17: Densidade de massa aparente no estado endurecido (ABNT NBR 13281, 2005).

Classe	ρ_{ap} (kg/m³) ABNT NBR 13281 (2005)	ρ_{ap-LC0} (kg/m³)	$\rho_{ap-LC100}$ (kg/m³)
M1	≤ 1200	1870	1800
M2	1000 a 1400		
M3	1200 a 1600		
M4	1400 a 1800		
M5	1600 a 2000		
M6	> 1800		

Ao avaliar a influência da lama de cal, como substituta parcial do cimento em argamassas autoadensáveis para pisos, Borinaga-Treviño *et al.* (2021) constataram que a densidade de massa aparente no estado endurecido tendeu a diminuir com o aumento do teor de lama de cal. Entretanto, observou-se comportamento inverso para a porosidade.

4.4.5 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

O ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade da argamassa no estado endurecido foi executado de acordo com a ABNT NBR 15259 (2005). Esse ensaio determina a absorção capilar num corpo de prova em função da variação de massa ao longo do tempo, até estabilização desta. A quantidade e o diâmetro dos poros na argamassa são parâmetros que influenciam esse ensaio, pois quanto mais interligados forem os poros capilares, maior será a absorção. Além disso, quanto menor o coeficiente de

capilaridade, melhor o desempenho da argamassa. Dessa forma, esse ensaio está diretamente relacionado à durabilidade do material.

De acordo com Marvila *et al.* (2017), o ensaio de absorção por capilaridade é indicativo da capacidade de transporte e entrada de agentes agressivos nas argamassas e, por esse motivo, é um parâmetro importante para a durabilidade do material.

Para a realização do ensaio foram confeccionados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (altura, largura e comprimento, respectivamente). Os corpos de prova foram moldados em duas camadas, sendo em cada uma aplicada 30 quedas na mesa de adensamento. Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias.

Lixou-se a superfície dos corpos de prova com lixa grossa (nº 100). Em seguida, foi utilizado um pincel com cerdas de náilon para limpar possíveis sedimentos depositados na superfície. Aferiu-se a massa inicial de cada corpo de prova e, posteriormente, foram colocados em um recipiente com água com uma das faces de seção transversal quadrada apoiada em seu fundo (Figura 27). Durante o ensaio, o nível de água foi mantido constante (5 ± 1 mm) acima da face em contato com a água e tomou-se cuidado para evitar a molhagem das outras superfícies dos corpos de prova. Determinou-se a massa de cada corpo de prova após 10 e 90 minutos de contato com a água. Antes de cada pesagem, cada corpo de prova foi previamente seco com um pano úmido.

A determinação da absorção por capilaridade foi calculada a partir da Equação 4.10.

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad 4.10$$

em que,

A_t é a absorção de água por capilaridade no tempo t , em g/cm²;

m_0 é a massa inicial de cada corpo de prova, em g;

m_t é a massa de cada corpo de prova medida no tempo t , em g;

16 é a área da face do corpo de prova em contato com a água, em cm².



Figura 27: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

De acordo com a ABNT NBR 13259 (2005), o coeficiente de capilaridade é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa de cada corpo de prova aos 10 e aos 90 minutos. O coeficiente de capilaridade foi calculado por meio do uso da Equação 4.11.

A Tabela 18 mostra o resultado do ensaio de absorção por capilaridade e a classificação da argamassa de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005).

$$C_n = m_{90} - m_{10} \quad 4.11$$

sendo,

C_n o coeficiente de capilaridade do corpo de prova n , em $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$;

m_{90} a massa de cada corpo de prova medida aos 90 minutos de ensaio, em g;

m_{10} a massa de cada corpo de prova medida aos 10 minutos de ensaio, em g.

Tabela 18: Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade (ABNT NBR 13281, 2005).

A_{t-LC0} (g/cm ²)	$A_{t-LC100}$ (g/cm ²)	Classe	C (g/dm ² ·min ^{1/2}) ABNT NBR 13281 (2005)	C_{LC0} (g/dm ² ·min ^{1/2})	C_{LC100} (g/dm ² ·min ^{1/2})
A₁₀ = 0,50	A₁₀ = 0,81	C1	≤ 1,5	13,13	16,51
		C2	1,0 a 2,5		
		C3	2,0 a 4,0		
		C4	3,0 a 7,0		
		C5	5,0 a 12,0		
		C6	> 10		
A₉₀ = 1,31	A₉₀ = 1,84				

De acordo com a Tabela 18, tanto a LC0 quanto a LC100 são classificadas como C6, indicando elevada permeabilidade. Essa característica não é muito adequada para argamassas de revestimento, pois a permeabilidade está relacionada à suscetibilidade dos materiais à degradação. Marousek *et al.* (2015) demonstraram que argamassas com coeficientes de capilaridade acima de 35 g/dm²·min^{1/2} têm seu desempenho prejudicado a médio e longo prazo, não sendo, portanto, o caso obtido neste estudo.

Um material permeável é mais poroso, mas vale ressaltar que para o material ser permeável é necessário que haja interconexão entre os poros. Por conseguinte, pode-se concluir que todo material permeável é poroso, mas nem todo material poroso é permeável (LAFHAJ *et al.*, 2006). Dessa forma, observa-se que a LC100 é um pouco mais permeável do que a LC0 e, consequentemente, mais porosa.

Verificou-se queda significativa de densidade de massa no estado endurecido em relação ao estado fresco nas argamassas. Como elas possuem retenção de água elevada, durante o processo de secagem, essa água evapora, criando vazios interconectados na matriz. Isso explica o elevado valor encontrado de coeficiente de capilaridade. Embora seja um material poroso, os valores de resistência à compressão e à tração são aceitáveis. Vale ressaltar que porosidade e resistência mecânica são grandezas inversamente proporcionais, quanto maior a porosidade, menor a resistência mecânica (CALLISTER, 2012).

4.4.6 Resistência potencial de aderência à tração

O ensaio de resistência potencial de aderência à tração foi realizado de acordo com a ABNT NBR 13528 (2010). Esse ensaio tem por objetivo determinar a tensão máxima alcançada num corpo de prova de revestimento, quando submetido a esforço perpendicular de tração à taxa constante de carregamento. A aderência da argamassa ao substrato é a capacidade que a interface argamassa-substrato possui de absorver tensões tangenciais e normais sem atingir a ruptura.

Inicialmente, um substrato-padrão de concreto foi preparado, satisfazendo as prescrições da ABNT NBR 14082 (2004). O substrato foi apoiado horizontalmente sobre uma base plana e firme. Com o auxílio de um pincel com cerdas de náilon, a superfície do substrato foi limpa para remover o pó ou qualquer outro fragmento que pudesse prejudicar a aderência da argamassa ao substrato. Foi utilizado um gabarito de madeira com profundidade uniforme de 18 ± 2 mm para assentar a argamassa sobre o substrato. Em seguida, pressionou-se a argamassa contra o substrato para eliminar os vazios e assegurar distribuição uniforme da argamassa sobre a superfície. Rasou-se a superfície com régua metálica e o conjunto foi curado na posição horizontal sob condições ambientais de laboratório por 28 dias (Figura 28).



Figura 28: Substrato de concreto com argamassa para ensaio de aderência à tração.

Aos 25 dias de cura, foram feitos 10 cortes até a profundidade de 1 mm no substrato, com o auxílio de uma serra copo de 50 mm de diâmetro. Os cortes foram feitos com distância mínima entre si de 20 mm, e distanciados da borda por, no

mínimo, 40 mm. Tomou-se bastante cuidado ao efetuar os cortes, uma vez que estes não podem interferir na integridade do revestimento. Após o corte do revestimento, 10 pastilhas metálicas de 50 mm de diâmetro foram coladas com resina epóxi na área delimitada pelos cortes. A Figura 29 mostra a disposição das pastilhas metálicas sobre a argamassa.



Figura 29: Pastilhas metálicas para o ensaio de aderência à tração.

Aos 28 dias o ensaio foi executado aplicando-se um esforço perpendicular de tração, utilizando um equipamento da marca SOLOTEST (Figura 30).



Figura 30: Ensaio de aderência à tração.

A resistência potencial de aderência à tração em cada pastilha foi determinada pela Equação 4.12.

$$R_i = \frac{P_i}{A_i} \quad 4.12$$

em que,

R_i é a resistência potencial de aderência à tração, em MPa;

P_i é a carga de ruptura, em N;

A_i é a área da seção transversal do corpo de prova, em mm².

A Tabela 19 mostra o resultado do ensaio de aderência à tração e a classificação da argamassa de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005).

Tabela 19: Resistência potencial de aderência à tração (ABNT NBR 13281, 2005).

Classe	R (MPa) ABNT NBR 13281 (2005)	R_{LC0} (MPa)	R_{LC100} (MPa)
A1	< 0,20	0,25	0,16
A2	≥ 0,20		
A3	≥ 0,30		

De acordo com a Tabela 19, a argamassa LC0 é classificada como A2, indicando boa aderência ao substrato, e a LC100 como A1, ou seja, baixa aderência ao substrato. Logo, observa-se que ao substituir a cal hidratada por lama de cal a aderência da argamassa ao substrato diminui, visto que a porosidade da LC100 é maior do que a da LC0, havendo, conseqüentemente, diminuição da área de contato para transferência de esforços mecânicos entre a argamassa e o substrato.

Segundo Marvila (2017), em argamassas de revestimento a aderência é uma propriedade muito importante, pois está relacionada à capacidade do revestimento se manter aderido ao substrato ao surgirem tensões na interface substrato-revestimento. Além disso, condições inadequadas na interface argamassa-substrato possibilitam manifestações patológicas, como, por exemplo, descolamento/queda de placas de fachadas. Portanto, quanto maior a aderência entre o substrato e a argamassa, melhor será o desempenho do sistema construtivo.

A ABNT NBR 15258 (2005) indica as formas de ruptura que podem ocorrer nos corpos de prova durante o ensaio de aderência à tração. A Tabela 20 mostra essa classificação.

Com relação ao tipo de ruptura deste estudo, em 80% dos corpos de prova da argamassa LC100 a ruptura foi do tipo S/A (Figura 31a) e no restante a ruptura foi do tipo A (Figura 31b), o que confirmou a baixa aderência da argamassa ao substrato. Já com relação à argamassa LC0, a ruptura foi do tipo A em todos os corpos de prova, confirmando que esta tem melhor aderência do que aquela.

Tabela 20: Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração.

Notação	Tipo de ruptura
S	Ruptura no substrato
S/A	Ruptura na interface substrato/argamassa
A	Ruptura na argamassa
F	Falha na colagem da pastilha metálica

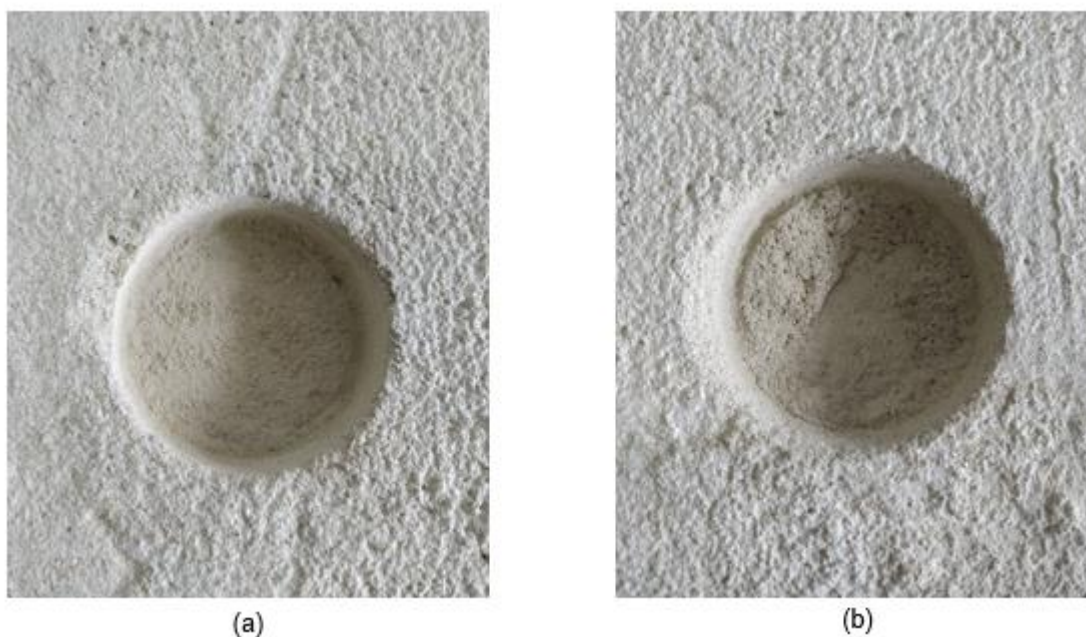


Figura 31: Tipos de ruptura no ensaio de aderência à tração: (a) ruptura na interface substrato/argamassa; (b) ruptura na argamassa;

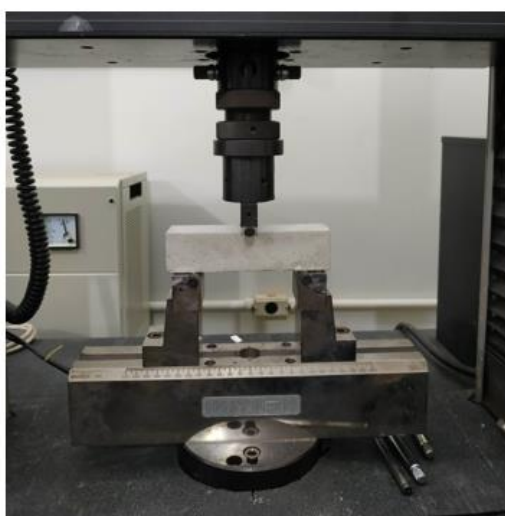
4.4.7 Resistência à tração na flexão e à compressão

Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão foram executados de acordo com a ABNT NBR 13279 (2005).

Para a realização dos ensaios, foram moldados 3 corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm (largura, altura e comprimento,

respectivamente). Os corpos de prova foram rompidos aos 28 dias numa prensa da marca Instron, modelo 5582, do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF.

Para determinar a resistência à tração na flexão, utilizou-se o ensaio de tração na flexão a três pontos. Dessa forma, o corpo de prova foi posicionado com suas extremidades apoiadas sobre o dispositivo com vão livre de 110 mm (Figura 32a) e carga com velocidade constante de 50 ± 10 N/s foi aplicada em seu centro geométrico, até a ruptura (Figura 32b).



(a)



(b)

Figura 32: Ensaio de resistência à tração na flexão a 3 pontos: (a) corpo de prova no início do ensaio; (b) corpo de prova após a ruptura.

Com os valores da carga de ruptura, a resistência à tração na flexão foi calculada por meio do uso da Equação 4.13.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F \cdot L}{40^3} \quad 4.13$$

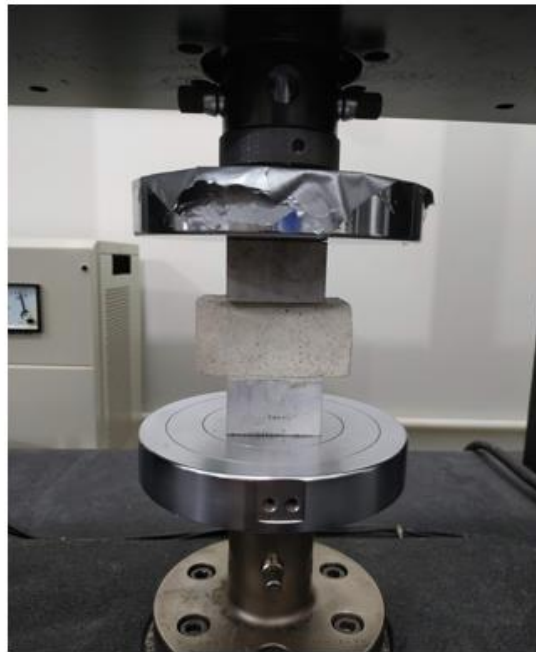
sendo,

R_f a resistência à tração do corpo de prova, em MPa;

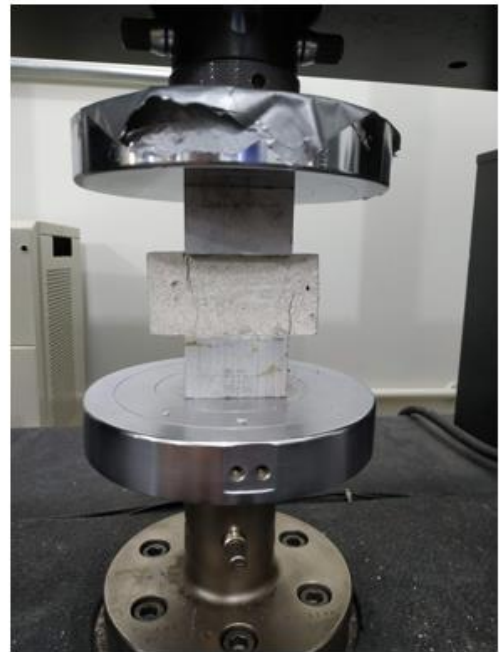
F a força aplicada pelo equipamento (carga de ruptura), em N;

L a distância entre os apoios (vão livre), em mm.

A ruptura do corpo de prova na flexão acontece praticamente no meio do vão livre, ou seja, o corpo de prova é dividido pela metade. Essas metades foram utilizadas para determinar a resistência à compressão. Dessa forma, o novo corpo de prova foi colocado entre dois suportes metálicos (Figura 33a) e uma carga com velocidade constante de 500 ± 50 N/s foi aplicada até a ruptura (Figura 33b).



(a)



(b)

Figura 33: Ensaio de resistência à compressão: (a) corpo de prova no início do ensaio; (b) corpo de prova após a ruptura.

De posse dos valores da carga de ruptura, a resistência à compressão foi calculada utilizando-se a Equação 4.14.

$$R_c = \frac{F}{1600} \quad 4.14$$

em que,

R_c é a resistência à compressão, em MPa;

F é a força aplicada pelo equipamento (carga de ruptura), em N;

1600 é a área da seção transversal quadrada do dispositivo de carga (40 mm x 40 mm), em mm².

As Tabelas 21 e 22 mostram o resultado do ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão, bem como a classificação da argamassa de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005).

Observa-se que ambas as argamassas são classificadas como R3 para resistência à tração e como P5 para resistência à compressão. Para a LC100, o resultado de resistência à tração (1,53 MPa) corresponde a 25% da resistência à compressão (6,11 MPa), aos 28 dias, e para a argamassa LC0 essa relação foi de 24%.

Nota-se que os valores de resistência à tração e à compressão da LC0 foram um pouco superiores do que da LC100. Essa diferença está relacionada com a porosidade dos materiais, visto que a LC100 é mais porosa do que a LC0, conforme evidenciado no item 4.4.5.

Tabela 21: Resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13281, 2005).

Tração na flexão			
Classe	R _f (MPa) ABNT NBR 13281	R _{f-LC0} (MPa)	R _{f-LC100} (MPa)
R1	≤ 1,5	1,65	1,53
R2	1,0 a 2,0		
R3	1,5 a 2,7		
R4	2,0 a 3,5		
R5	2,7 a 4,5		
R6	> 3,5		

Os valores obtidos de resistência à tração e à compressão neste estudo foram coerentes com os relatados por Azevedo *et al.* (2018) e Azevedo *et al.* (2020). Em contrapartida, foram abaixo dos valores relatados por Vashistha e Kumar (2020), ao substituir parcialmente o cimento Portland por lama de cal calcinada a 750°C, beneficiamento que resultou em aumento da reatividade do resíduo.

Tabela 22: Resistência à compressão (ABNT NBR 13281, 2005).

Compressão			
Classe	R _c (MPa) ABNT NBR 13281	R _{c-LC0} (MPa)	R _{c-LC100} (MPa)
P1	≤ 2,0	6,83	6,11
P2	1,5 a 3,0		
P3	2,5 a 4,5		
P4	4,0 a 6,5		
P5	5,5 a 9,0		
P6	> 8,0		

Embora a ABNT NBR 13281 (2005) especifique diferentes classificações para as argamassas, os valores dessas classes não estão associados a fins específicos. Dessa forma, é necessário que a resistência da argamassa seja definida em cada projeto, de maneira que atenda às exigências de sua aplicação.

Segundo Alves (2018), a resistência à tração e à compressão não são as principais propriedades para argamassas de revestimento de paredes e tetos. Nesse caso, a trabalhabilidade e a aderência são mais relevantes. Já para Ramalho e Corrêa (2003), em se tratando de assentamento de tijolos e blocos, principalmente em alvenaria estrutural, a resistência à compressão da argamassa não deve possuir resistência mecânica muito inferior à dos blocos, a fim de não comprometer a resistência final do sistema construtivo.

4.4.8 Comparação da argamassa LC100 com argamassas comerciais

Após classificar a argamassa LC100 de acordo com a ABNT NBR 13281 (2005), é válido comparar suas propriedades com as de outras argamassas comercializadas no mercado nacional. Dessa forma, a Tabela 23 mostra a comparação entre a argamassa LC100 com algumas argamassas da marca Votorantim.

Percebe-se que a argamassa LC100 obteve resultados satisfatórios em alguns aspectos, igualando-se, ou até mesmo atingindo valores superiores em alguns casos, às comerciais. Levando-se em consideração a substituição total da cal hidratada por um resíduo industrial (lama de cal), os resultados obtidos demonstram

que, mesmo para esse teor elevadíssimo de substituição, é possível desenvolver novos materiais sustentáveis com propriedades adequadas para aplicação na Construção Civil. No entanto, mais pesquisas com esse material precisam ser feitas a fim de viabilizar sua comercialização de maneira confiável.

Tabela 23: Comparação entre a argamassa LC100 e argamassas comerciais da Votorantim.

Propriedade	Votomassa Assentamento, vedação e encunhamento	Votomassa Múltiplo uso	Votomassa Assentamento estrutural 5 MPa	Votomassa Assentamento estrutural 7 MPa	LC100
Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	D4 (1600 a 2000)	D4 (1600 a 2000)	D5 (1880 a 2100)	D5 (1880 a 2100)	D6 (2004)
Retenção de água (%)	U3 (80 a 90)	U3 (80 a 90)	U2 (73 a 84)	U2 (73 a 84)	U6 (98)
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)	M4 (1400 a 1800)	M4 (1400 a 1800)	M5 (1650 a 1950)	M5 (1650 a 1950)	M5 (1800)
Coefficiente de capilaridade (g/dm ² ·min ^{1/2})	C5 (5,0 a 12,0)	C5 (5,0 a 12,0)	C5 (5,0 a 12,0)	C4 (4,0 a 6,0)	C6 (16,5)
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	-	A3 ≥ 0,30	-	-	A1 (0,16)
Resistência à tração na flexão (MPa)	R2 (1,0 a 2,0)	R3 (1,5 a 2,7)	R3 (1,5 a 2,7)	R5 (2,9 a 4,3)	R3 (1,53)
Resistência à compressão (MPa)	P3 (2,5 a 4,5)	P4 (4,0 a 6,5)	P4 (4,0 a 6,5)	P6 (10,0 a 12,0)	P5 (6,11)

4.5 Ensaios analíticos das argamassas

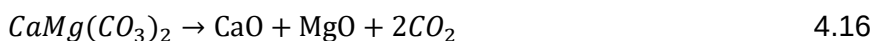
4.5.1 Termogravimetria (TG) e sua diferencial (DTG)

A análise térmica das argamassas foi realizada com amostras das 5 dosagens, aos 28 dias, sob as mesmas condições de ensaio descritas no item 3.3.4.

A Figura 34 compara a termogravimetria das argamassas LC0 e LC100. Pode-se notar comportamento bastante similar entre as argamassas. O primeiro pico, entre 50 e 100°C, representa a perda de água livre, adsorvida ou capilar e é proporcional à quantidade de água presente nos poros da argamassa. O segundo pico, em torno dos 130°C, está relacionado ao C-S-H (RAMACHANDRAN *et al.*, 2002). O terceiro pico a 435,39°C na LC0 e 444,32°C na LC100 é atribuído a desidroxilação da portlandita (Equação 4.15). Além disso, até esse pico é observada perda de massa de 3,9% na LC100 e 4,6% na LC0.



O quarto e último pico é o mais expressivo e está relacionado à decomposição da calcita (Equação 3.1) e da dolomita (Equação 4.16), que ocorre a aproximadamente 750°C (SILVA, 2018). Esse comportamento tanto pode ter ocorrido devido à presença de CaCO₃, proveniente das reações com a cal hidratada e a lama de cal, bem como pode estar relacionado à carbonatação das amostras. Entretanto, pode-se observar que esse pico é mais expressivo nas argamassas que contêm lama de cal, uma vez que o resíduo possui mais CaCO₃ do que a cal hidratada. Como a análise termogravimétrica foi feita com taxa de aquecimento de 15°C/min (relativamente rápida), não foi possível diferenciar os picos em que ocorrem as decomposições da calcita e da dolomita. Provavelmente, se o ensaio tivesse sido feito com taxa de aquecimento mais lenta (5°C/min ou menos), por exemplo, as decomposições seriam identificadas com melhor precisão.



Nota-se que, embora a argamassa LC0 possua quantidade ligeiramente superior de portlandita e inferior de carbonato de cálcio em relação à LC100, essa diferença não foi suficiente para alterar significativamente a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias, pois foi compensada pela quantidade de C-S-H um pouco maior na LC0. Cabe ressaltar que o C-S-H foi identificado na análise térmica, pois possui estrutura semicristalina à amorfa e a termogravimetria possibilita a identificação de fases vítreas.

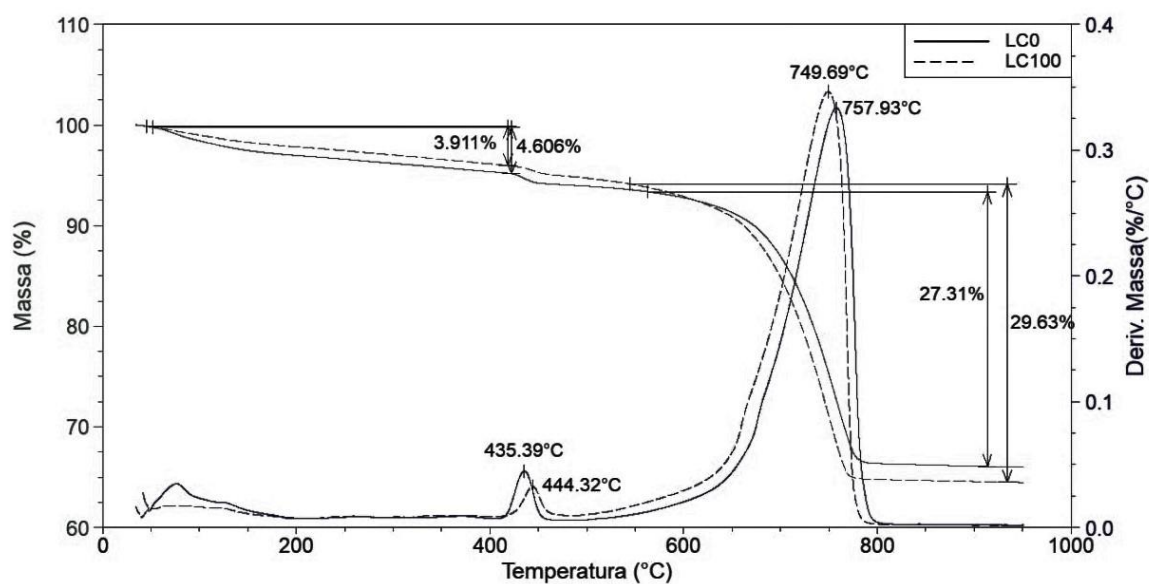


Figura 34: Curvas TG/DTG das argamassas LC0 e LC100.

As curvas termogravimétricas das outras argamassas são mostradas nas Figuras 35 a 37. Ao comparar todas as argamassas, nota-se que a LC100 obteve a menor perda de massa até a desidroxilação da portlandita (3,9%) e que a perda de massa total de todas as argamassas foi próxima.

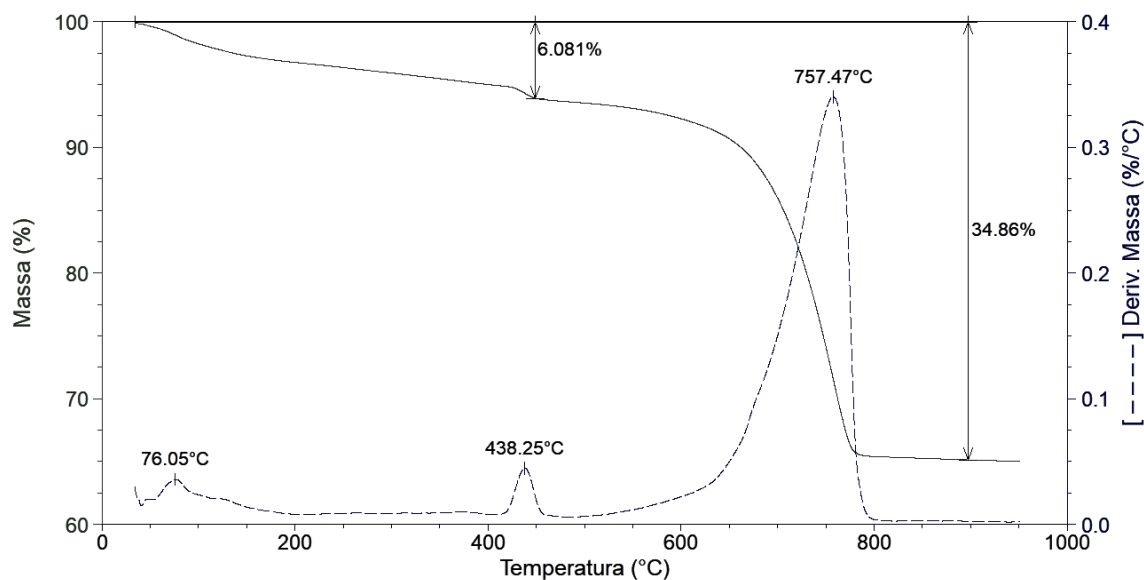


Figura 35: Curvas TG/DTG da argamassa LC25.

A argamassa com menor perda de massa total foi a LC0, com 33,6%. Em contrapartida, a com maior perda de massa total foi a LC75 (35,68%). Essa pequena diferença pode ser explicada pela presença de matéria orgânica na lama de cal, já

que é um resíduo proveniente da produção da polpa celulósica (material de origem vegetal) e que não sofreu nenhum beneficiamento prévio (calcinação, por exemplo), diferentemente da cal hidratada, que é proveniente de um processo de extração mineral com posterior calcinação.

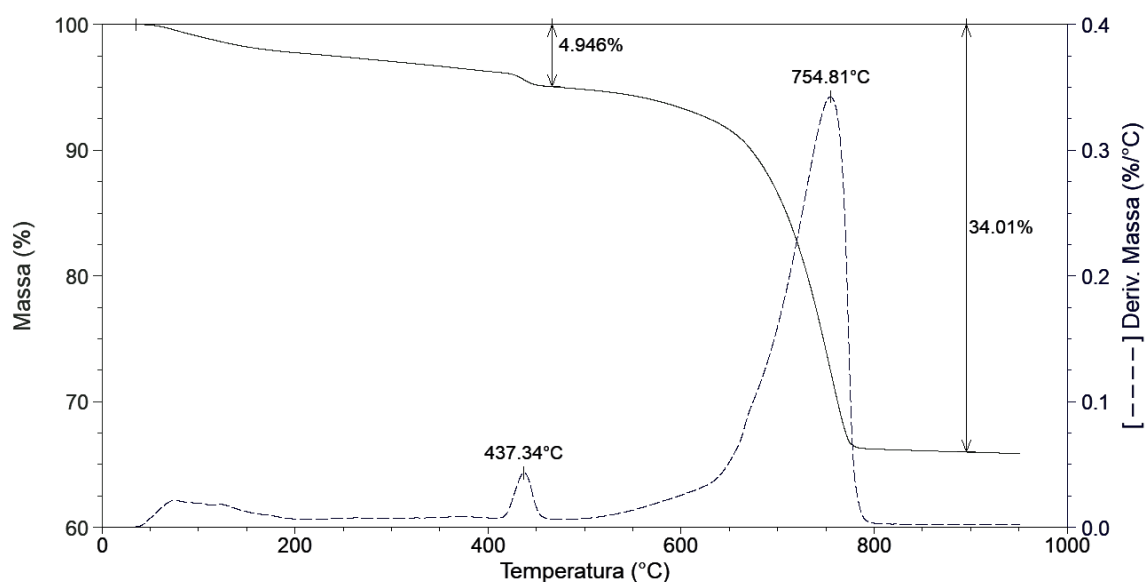


Figura 36: Curvas TG/DTG da argamassa LC50.

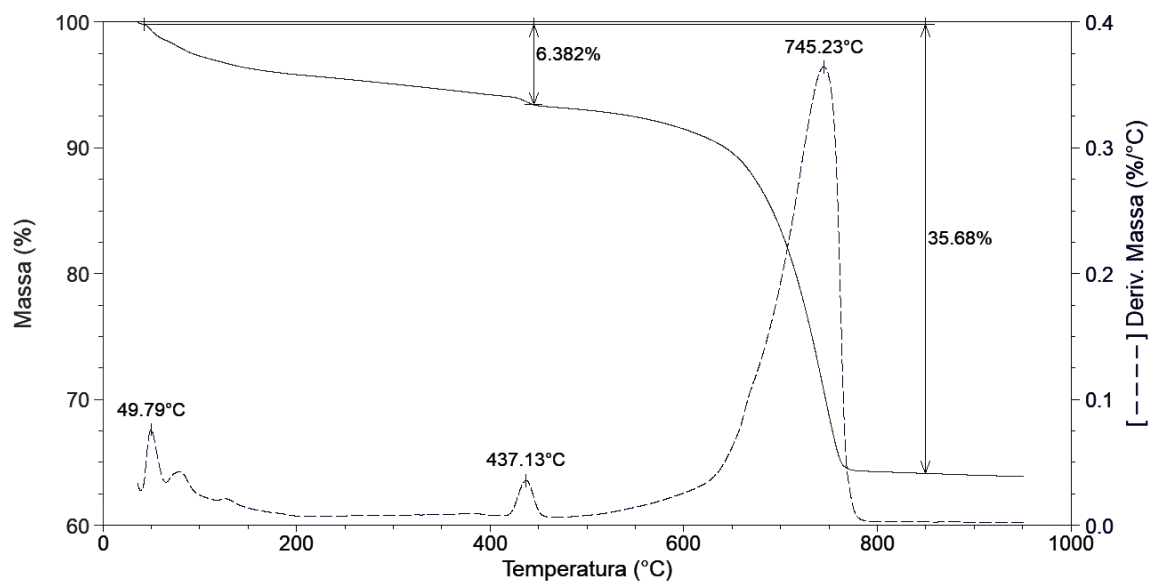


Figura 37: Curvas TG/DTG da argamassa LC75.

4.5.2 Difração de raios X (DRX)

A identificação das fases cristalinas nas argamassas foi realizada após 28 dias de cura em temperatura ambiente de laboratório e seguiu os procedimentos descritos no item 3.3.3.

A Figura 38 compara os difratogramas das 5 argamassas estudadas. As fases cristalinas identificadas nas amostras foram: calcita (CaCO_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] e sílica (SiO_2), representadas no difratograma por C, D, CH e Q, respectivamente. A intensidade dos picos está relacionada à maior ou menor quantidade de determinada fase cristalina presente na amostra.

Comparando-se as amostras, a principal diferença observada foi a redução gradativa da quantidade de dolomita à medida que a cal hidratada foi sendo substituída pela lama de cal. Este resultado indica que a cal hidratada contém mais Mg^{2+} em sua composição do que a lama de cal. Embora o Mg^{2+} não tenha sido identificado na análise por fluorescência de raios X - EDX (item 3.7), esse elemento foi identificado nas análises por DRX, pois esta técnica analítica é mais sensível do que aquela (SANTIAGO *et al.*, 2003). Assim, verifica-se que estas técnicas não são concorrentes entre si, e sim complementares.

Além disso, nota-se pequeno aumento na formação de calcita à medida que a cal hidratada foi sendo substituída pela lama de cal, indicado pelos ângulos 23, 36, 39, 44, 49 e 58°. Assim, conforme a quantidade de dolomita diminui, a formação de calcita aumenta, compensando eventual perda de resistência mecânica da argamassa em função deste fenômeno.

Em relação às outras fases cristalinas, nota-se que os picos se mantiveram praticamente inalterados para todas as amostras. Estes resultados justificam os valores de resistência mecânica bem próximos entre si das argamassas avaliadas (Figura 20).

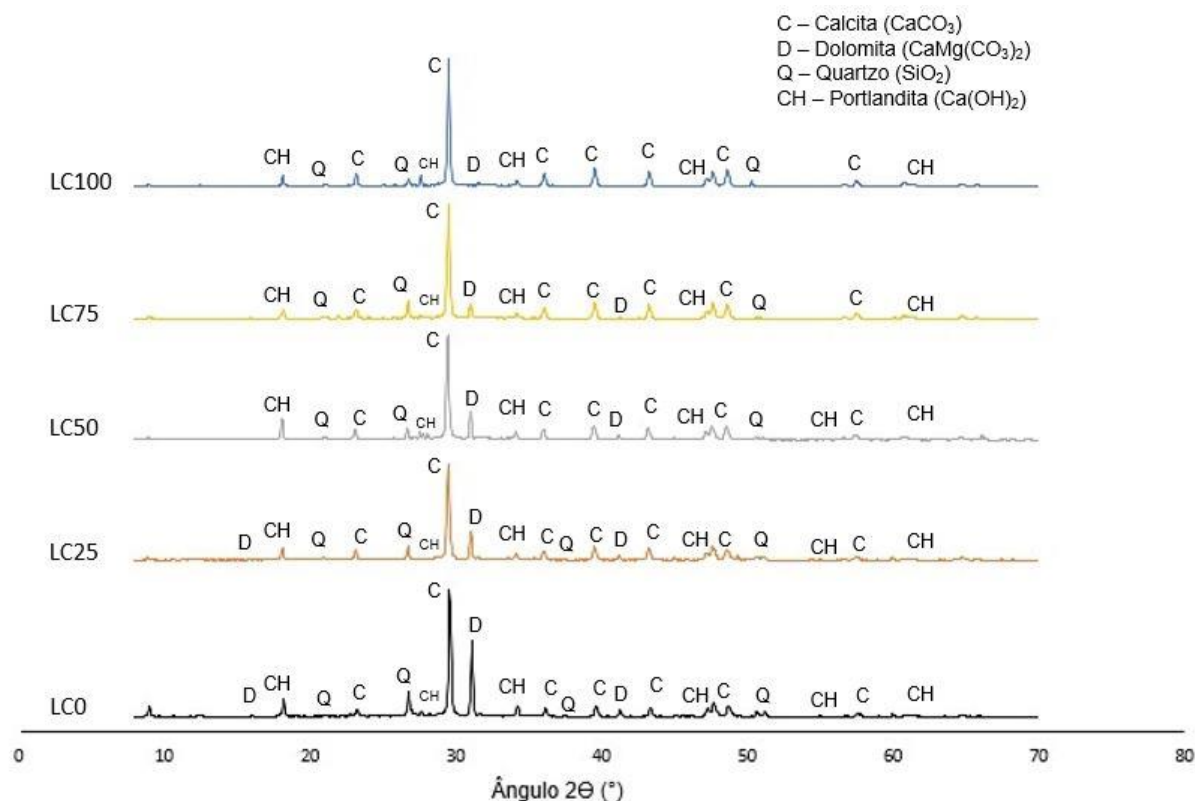


Figura 38: Difratoograma de raios X das argamassas.

4.5.3 Calorimetria isotérmica

O ensaio de calorimetria isotérmica é uma técnica analítica que fornece a medida da quantidade de calor e da taxa de produção desse calor. Calorimetria isotérmica e semiadiabática são as principais técnicas empregadas para a análise de materiais à base de cimento Portland, sendo a calorimetria isotérmica a mais comum. Por meio desta técnica, a taxa de produção de calor (energia térmica) de pequenas quantidades de materiais à base de cimento Portland pode ser medida diretamente. Por outro lado, os calorímetros semiadiabáticos medem a temperatura. É possível calcular uma dessas medidas a partir da outra, utilizando-se de derivadas - para se obter a taxa de produção de calor a partir da temperatura -, ou de integrais - para se obter a temperatura a partir da taxa de produção de calor (WADSÖ *et al.*, 2016).

O ensaio de calorimetria foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF em um calorímetro isotérmico I-CAL 2000 HPC da Calmetrix (Figura 39). A medida da taxa de liberação de calor das argamassas LC0 e LC100 iniciou-se imediatamente após a mistura e prolongou-se até as 48 horas posteriores.

Durante o ensaio, tomou-se o cuidado de se manter tanto a temperatura do equipamento quanto do ambiente constantes em 23°C.

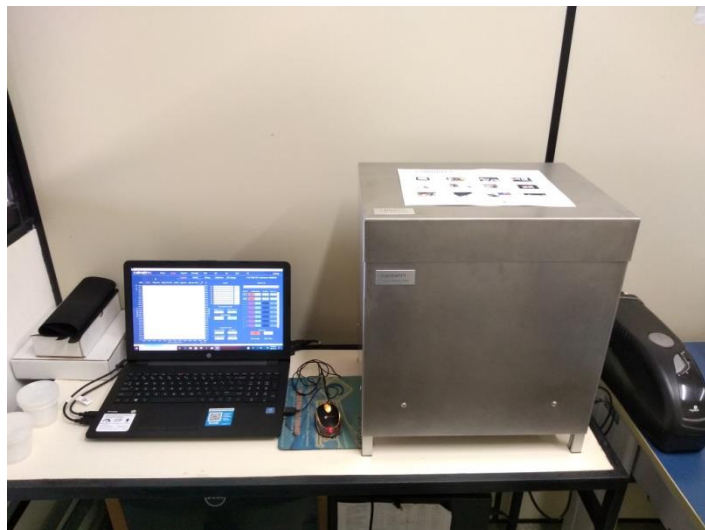


Figura 39: Calorímetro isotérmico.

As Figuras 40 a 42 mostram as curvas de fluxo de calor das argamassas LC0 e LC100 obtidas por calorimetria isotérmica a 23°C. O comportamento calorimétrico das duas argamassas foi bastante similar, de modo que as curvas de fluxo de calor de ambas, quando inseridas no mesmo gráfico ficaram praticamente sobrepostas. Então, para melhor observar as principais diferenças entre elas, optou-se por inserir as curvas lado a lado (Figura 40) e sobrepostos numa escala menor com ênfase nos principais picos (Figuras 41 e 42).

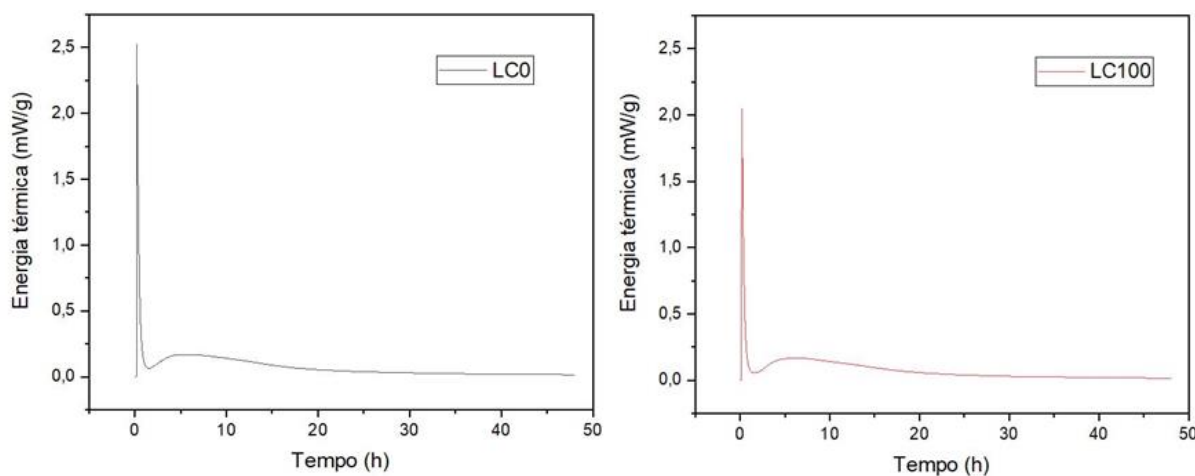


Figura 40: Fluxo de calor das argamassas LC0 e LC100.

Durante os primeiros minutos, certa quantidade de calor é liberada devido à hidratação das partículas dos materiais cimentícios e a dissolução dos cristais (estágio I). Em seguida, inicia-se o período de hidratação por indução, em que alta concentração de íons é alcançada, pois as partículas continuam a se dissolver e os hidratos cristalinos são formados (estágio II). Após o período de indução, ocorre a cristalização dos hidratos de cimento (estágio III). Em seguida, a liberação de calor diminui e os processos se tornam mais lentos (estágios IV e V).

A Figura 41 mostra o pico inicial das curvas de fluxo de calor das argamassas LC0 e LC100. O tempo do ensaio começa a ser contado desde o instante em que os materiais cimentícios entram em contato com a água, por isso o gráfico não se inicia no tempo zero. No presente estudo, o tempo gasto desde o preparo das argamassas até a acomodação das amostras no equipamento foi de aproximadamente 8 minutos.

Durante o estágio I da hidratação, a substituição total da cal hidratada por lama de cal não afetou de forma relevante a taxa de liberação de calor. Esse comportamento também foi observado por Malaiškienė *et al.* (2019) ao substituir parcialmente o cimento Portland por lama de cal seca a 75°C. Nota-se que o valor máximo da energia térmica da argamassa LC0 foi de 2,5 mW/g e da argamassa LC100 foi de 2,0 mW/g.

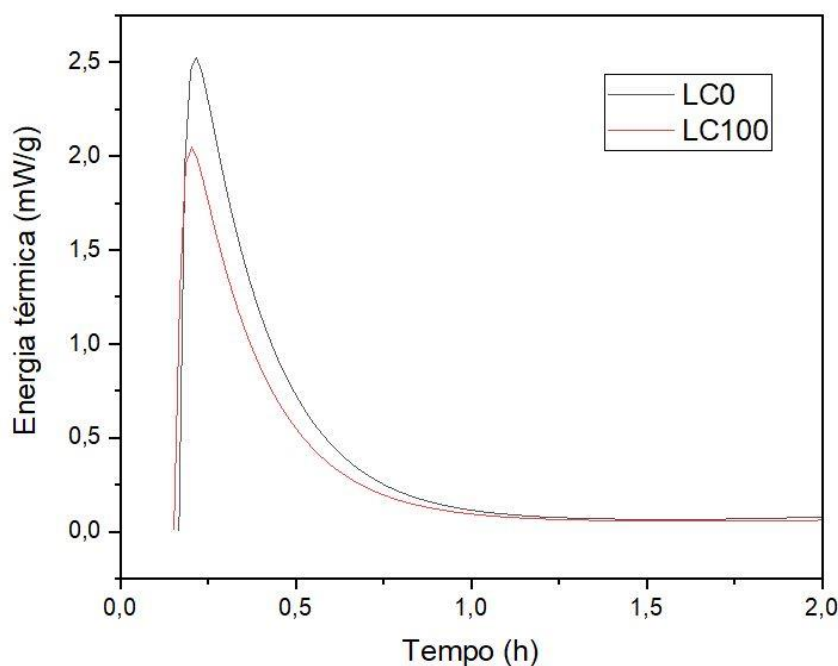


Figura 41: Estágio I de hidratação das argamassas LC0 e LC100.

A Figura 42 mostra o período de indução (estágio II) e de aceleração (estágio III) das argamassas LC0 e LC100. Observa-se que na argamassa LC100 o período de hidratação por indução é um pouco mais prolongado e provoca um pequeno atraso na liberação de calor no estágio III. Assim, o tempo de pega é retardado em aproximadamente 15 minutos em comparação à LC0. Nota-se, ainda, que na argamassa LC0 os tempos de início e fim de pega ocorrem em 2 e 4 horas, respectivamente. Já na argamassa LC100 esses tempos ocorrem em 2,25 e 4,25 horas.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), define-se pega como o enrijecimento da pasta de cimento ao passar do estado fluido para o rígido, sendo consequência física dos processos químicos que ocorrem no interior da pasta. O tempo de início de pega marca o ponto a partir do qual a pasta não é mais trabalhável. Já o tempo de fim de pega representa o tempo necessário para a pasta se solidificar completamente. Portanto, nota-se que a argamassa LC100 pode ser trabalhável por período de tempo maior do que a argamassa LC0 (aproximadamente 0,25 horas ou 15 minutos).

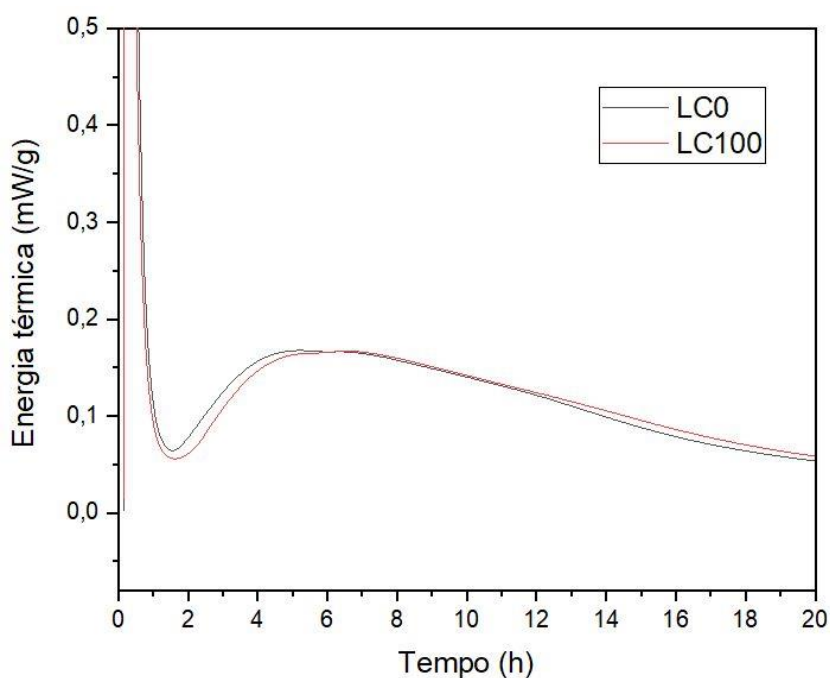


Figura 42: Estágios II e III de hidratação das argamassas LC0 e LC100.

Além das curvas de fluxo de calor, foram obtidas, por integração dos dados obtidos no calorímetro, conforme procedimento descrito na ASTM C1702, as curvas de calor total liberado ou calor de hidratação acumulado até 48 horas (Figura 43). A quantidade de calor liberada na argamassa LC0 foi de 131 J/g e na LC100 foi de 128,1 J/g. Nota-se que ao substituir totalmente a cal hidratada por lama de cal, a quantidade de calor liberado diminuiu cerca de 3%.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o calor de hidratação pode ser favorável em certas situações como, por exemplo, ao fornecer energia de ativação para as reações de hidratação em locais frios, e desfavorável em outras como, por exemplo, na fissuração de peças estruturais com grande volume. Quanto maior o calor de hidratação, maior será a retração térmica e, conseqüentemente, maior será o aparecimento de fissuras. Dessa forma, além do fator estético, a fissuração compromete a durabilidade dos elementos estruturais, pois permite a entrada de agentes agressivos que provocam reações químicas destrutivas, tais como carbonatação e ataque por ácidos e sulfatos.

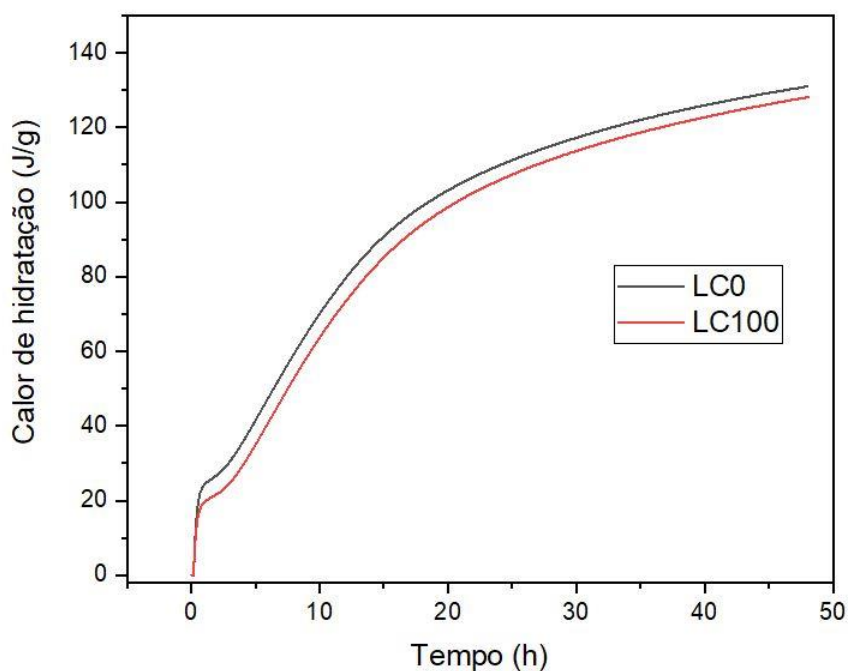


Figura 43: Calor de hidratação das argamassas LC0 e LC100.

4.5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias das argamassas foram realizadas após 28 dias de cura em temperatura ambiente de laboratório e seguiram os procedimentos descritos no item 3.3.2. A Figura 44 mostra as micrografias da argamassa LC0 e a Figura 45 mostra as micrografias da argamassa LC100.

Analisando estas imagens, nota-se que as argamassas não possuem diferenças significativas em suas microestruturas, o que era esperado, uma vez que os valores de resistência mecânica entre as argamassas foram similares.

Os pontos indicados nas Figuras 44b e 45b mostram a formação de cristais de etringita com formato acicular (Ponto 1), cristais de calcita (Ponto 2), lamelas hexagonais de portlandita (Ponto 3) e C-S-H (Ponto 4) em ambas as argamassas, sendo essas fases as responsáveis pela resistência mecânica das mesmas. Tais fases também foram identificadas por Malaiskiene *et al.* (2018) ao avaliar a influência do lodo primário da produção de papel e celulose nas propriedades de pastas e argamassas de cimento Portland e por Malaiškienė *et al.* (2019) ao analisar a influência da lama de cal seca a 75°C na hidratação do cimento.

As análises microestruturais estão de acordo com as análises termogravimétricas, que indicaram menor presença de portlandita na argamassa LC100 em relação à LC0, sendo que esse composto é menos aparente nas micrografias, enquanto que a calcita é amplamente observada em ambas as argamassas.

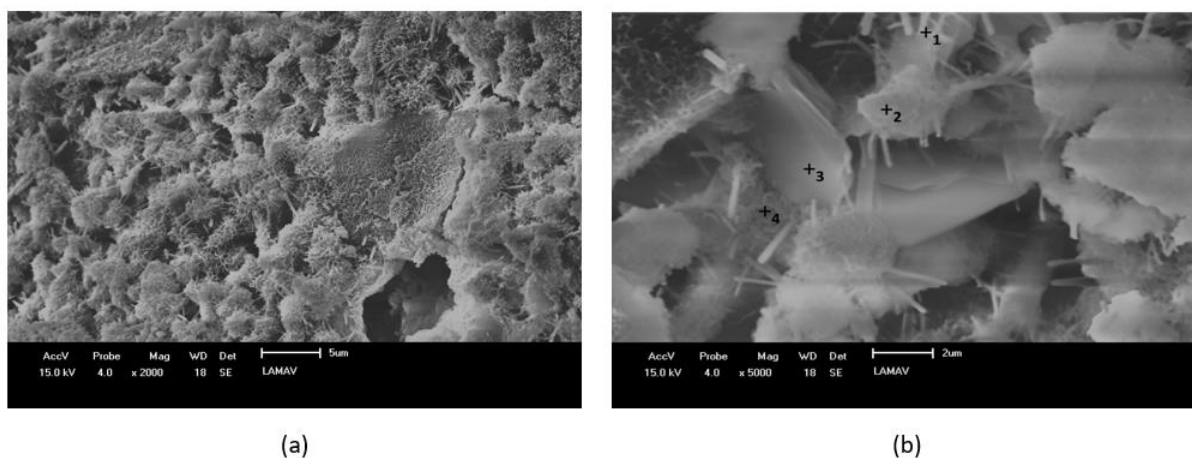
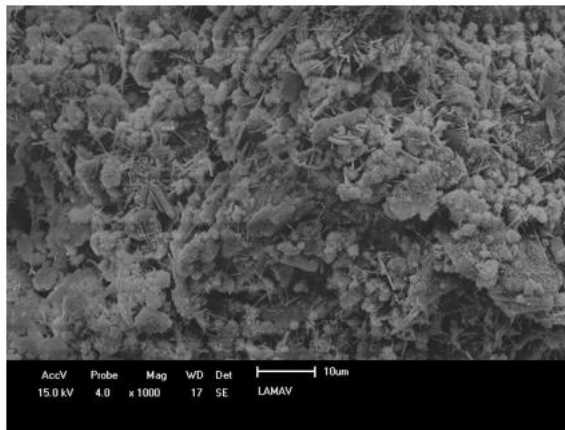
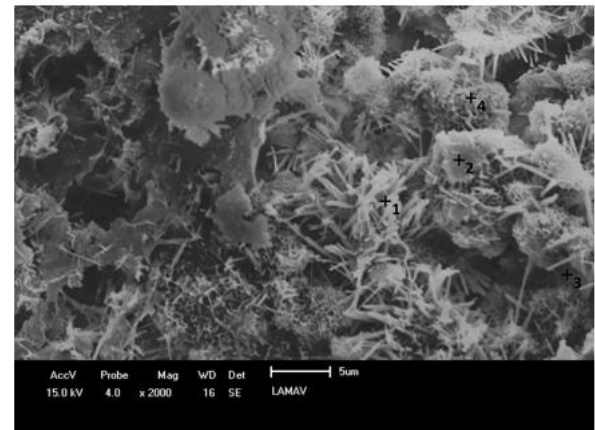


Figura 44: Micrografia da argamassa LC0: a) com aumento de 2000x; b) com aumento de 5000x.



(a)



(b)

Figura 45: Micrografia da argamassa LC100: a) com aumento de 1000x; b) com aumento de 2000x.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos no programa experimental foi possível concluir:

- a composição química da lama de cal indicou que o resíduo é composto predominantemente por CaO presente sob a forma de CaCO_3 , ou seja, a lama de cal é praticamente um calcário;
- o difratograma de raios X mostrou que a calcita é a única fase encontrada na lama de cal;
- ao substituir a cal hidratada por lama de cal na produção das argamassas a demanda de água para o nível de consistência padrão é mantida;
- a argamassa LC25 obteve a maior resistência à compressão aos 28 dias;
- as médias de resistência à compressão das argamassas LC0, LC50, LC75 e LC100 são estatisticamente iguais, pois o efeito *filler* proporcionado pelo resíduo contribuiu de forma semelhante à reatividade da cal hidratada;
- o acompanhamento do ganho de resistência mecânica ao longo do tempo mostrou que a argamassa LC100 atingiu a resistência máxima por volta dos 28 dias, uma vez que aos 60 dias os valores se mantiveram;
- a substituição da cal hidratada por lama de cal resultou numa pequena diminuição da densidade de massa nos estados fresco e endurecido da argamassa, uma vez que a cal hidratada CH-III possui massa específica um pouco maior do que a da lama de cal;
- a substituição total da cal hidratada por lama de cal provocou aumento de 2% no teor de ar incorporado da argamassa;
- a substituição total da cal hidratada por lama de cal provocou aumento de 4% na retenção de água da argamassa;
- o coeficiente de capilaridade da argamassa LC100 é maior em relação à argamassa LC0 (referência), indicando que esta é menos permeável do que aquela e, portanto, menos porosa;

- a aderência ao substrato da argamassa LC0 é maior do que da LC100, uma vez que possui maior área de contato entre os materiais, por ser menos porosa;
- as análises termogravimétricas indicaram a presença de água livre, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), portlandita (CH) e calcita (CaCO_3) em quantidades similares nas argamassas avaliadas;
- os difratogramas de raios X das argamassas identificaram calcita (CaCO_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] e sílica (SiO_2) como fases cristalinas;
- as micrografias mostraram que as argamassas não possuem diferenças microestruturais significativas, bem como a presença de etringita, calcita, portlandita e silicato de cálcio hidratado;
- os difratogramas de raios X mostraram que a quantidade de dolomita diminui em função da substituição da cal hidratada por lama de cal, mas não é suficientemente significativa para diminuir a resistência mecânica dos materiais, em função do aumento na quantidade de calcita que ocorre concomitantemente;
- o comportamento calorimétrico das duas argamassas foi bastante similar;
- na argamassa LC100 o tempo de pega é retardado em aproximadamente 15 minutos em comparação à LC0. Logo, a argamassa LC100 pode ser trabalhável por período de tempo maior do que a LC0;
- ao substituir totalmente a cal hidratada por lama de cal a quantidade de calor liberado diminuiu cerca de 3%;
- por fim, conclui-se que é possível substituir a cal hidratada por lama de cal na produção de argamassas de múltiplo uso e obter um material com características satisfatórias para aplicação na Construção Civil.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando o potencial da lama de cal no desenvolvimento de novos materiais sustentáveis, sugere-se para trabalhos futuros:

- avaliar as argamassas por meio de ensaios de durabilidade, tais como lixiviação, solubilização, ataques por sulfatos e ácidos, ciclos de molhagem e secagem, entre outros;
- produzir argamassas com lama de cal proveniente de outras indústrias brasileiras, visto que cada uma delas tem suas peculiaridades durante o processo produtivo e isso pode influenciar no produto final;
- utilizar outras técnicas analíticas para avaliar as argamassas, como espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (*FTIR*), ressonância magnética nuclear com rotação de ângulo mágico (*NMR-MAS*) e espectroscopia Raman, entre outras;
- avaliar as argamassas por meio de outros ensaios mecânicos, como resistência ao cisalhamento e tração direta, entre outros;
- estudar outras dosagens de argamassas com lama de cal, visando outras aplicações;
- utilizar a lama de cal em outros materiais de construção, como em concretos e outros tipos de argamassas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. (2018) Determinação das Propriedades Físicas, Químicas e Mecânicas de Argamassas à Base de Metacaulim Ativado por NaOH, KOH E NaOH + KOH. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF.

ALVES, E. D., PINHEIRO, O. S., COSTA, A. O. S. da., JUNIOR, E. F. da C. (2015) *Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal*. Liberato, Novo Hamburgo, v. 16, p. 205-217.

AMARAL, M. C. (2016) Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo de lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento. Tese (doutorado em engenharia e ciência dos materiais) - Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF.

American Society for Testing and Materials - ASTM C1231. (2000) *Standard practice for use of unbounded caps in determination of compressive strength of hardened concrete cylinders*. Novo México.

American Society for Testing and Materials - ASTM C1702. (2017) *Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry*. Novo México.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2000) Cimento Portland - determinação da densidade: NBR 6474 NM 23.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002) Concreto - Determinação do Teor de Ar em Concretos Recentemente Misturados - Método de Pressão: NBR NM 47, Rio de Janeiro. Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003) Agregados – Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003) Cal hidratada para argamassas - Requisitos: NBR 7175. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004) Resíduos Sólidos - Classificação: NBR 10004 - Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278, Rio de Janeiro. Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido: NBR 13280, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos: NBR 13281 - Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água: NBR 13277. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão: NBR 13279, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade: NBR 15259. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009) Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9778, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010) Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração: NBR 13528. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011) Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos: NBR 7222, Rio de Janeiro. Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013) Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação: NBR 13749 - Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) - Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: NBR 5752 - Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) - Materiais pozolânicos - Requisitos: NBR 12653 - Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016) Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência: NBR 13276. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018) Cimento Portland – Requisitos: NBR 16697. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018) Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro.

AZEVEDO, A.R.G *et al.* (2018) *Recycling paper industry effluent sludge for use in mortars: A sustainability perspective*. Journal of Cleaner Production v.192, p335-346.

AZEVEDO, A.R.G. *et al.* (2020) *Technological and environmental comparative of the processing of primary sludge waste from paper industry for mortar*. Journal of Cleaner Production, v. 249, p.119336.

BARTLETT, M. S. (1937) *Properties of sufficiency and statistical tests*. *Proceedings of the Royal Statistical Society – Serie A*, 60:268-282.

BEZERRA, I. M. T. (2010) Cinza da casca do arroz utilizada em argamassas de assentamento e revestimento. Dissertação (Mestrado) – Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande.

BORINAGA-TREVIÑO R., CUADRADO J., CANALES J., ROJÍ, E. (2021) *Lime mud waste from the paper industry as a partial replacement of cement in mortars used on radiant floor heating systems*. Journal of Building Engineering.

BUI N.K. , SATOMI T. , TAKAHASHI H. (2019) *Influence of industrial by-products and waste paper sludge ash on properties of recycled aggregate concrete* J. Clean. Prod., 214, pp. 403-418.

CALIARI, Í. P., BARBOSA, M. H., FERREIRA, S. O., & TEÓFILO, R. F. (2017) *Estimation of cellulose crystallinity of sugarcane biomass using near infrared spectroscopy and multivariate analysis methods*. Carbohydrate polymers, 158, 20-28.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. LTC, v. 8º Edição, 2012.

CARASEK, H. (2010) Argamassas. In: ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil, 2ªed., São Paulo: IBRACON, v 1.

CHO, J.S., MOON, K.L., CHOL, M.K., CHO, K.H. (2017) *Performance improvement of local Korean natural hydraulic lime-based mortar using inorganic by-products*, Korean J. Chem. Eng., 34(5), 1385-1392.

COLODETTE, J.L., GOMES, F.J.B. (2015) *Branqueamento de Polpa Celulósica*. 1ª Edição, Editora UFV, Viçosa, 816p.

CONTRERAS M., TEIXEIRA S.R., LUCAS M.C., LIMA L.C.N., CARDOSO D.S.L., DA SILVA G.A.C., GREGÓRIO G.C., DE SOUZA A.E., DOS SANTOS A. (2016) *Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study)* Construct. Build. Mater., 123, pp. 594-600.

COSTA, J. S. (2006) Agregados alternativos para argamassa e concreto produzidos a partir da reciclagem de rejeitos virgens da indústria de cerâmica tradicional. Tese (Doutorado), Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, São Carlos, 208p.

DAVISON B. H., PARKS J., DAVIS M. F. & DONOHOE B. S. (2013) *Plant cell walls: basics of structure, chemistry, accessibility and the influence on conversion*. Aqueous Pretreatment of Plant Biomass for Biological and Chemical Conversion to Fuels and Chemicals, 23-38.

DEUS R.M., BATTISTELLE R.A.G., SILVA G.H.R. (2017) *Current and future environmental impact of household solid waste management scenarios for a region of Brazil: carbon dioxide and energy analysis* J. Clean. Prod., 155 (1), pp. 218-228.

DUNNETT, C.W. (1955) *A multiple comparison procedure for comparing several treatments with a control*. J. Am. Statist. Assoc. 50: 1096-1121.

EBRINGEROVÁ, A. (2005) *Structural diversity and application potential of hemicelluloses*. In Macromolecular Symposia (Vol. 232, No. 1, pp. 1-12). WILEY-VCH Verlag.

FETENE Y., ADDIS T., BEYENE A., KLOOS H. (2018) *Valorization of solid waste as key opportunity for green city development in the growing urban areas of the developing world*. J. Environ. Chem. Eng., 6, pp. 7144-7151.

FIORITO, A. J.S.I. (2009) Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução. 2. ed. - São Paulo: Pini.

FOELKEL, C. (2011) *Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose KRAFT de eucalipto. Parte 05: Resíduos Minerais*. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel: Eucalyptus Online Book & Newsletter.

GOEL G., KALAMDHAD A.S. (2017) *An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing* Constr. Build. Mater., 148, pp. 334-343.

GUERRA, M. A. de S. L. (2007) Avaliação de Indicadores Biológicos e Físico-químicos no Composto Orgânico Produzido a Partir de Resíduos da Indústria de

Celulose. Dissertação (Pós-Graduação em Ciência Florestal) – Viçosa, MG - Universidade Federal de Viçosa (UFV).

GUIMARÃES, J. E. P. (2002) A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil. São Paulo: Pini.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. (2020) Relatório Anual. 66 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 20 de abril de 2021.

JULIANI, A.J. (2015) Aplicação da modernização ecológica no setor de papel e celulose do Brasil. Tese de doutorado: Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal de Brasília, Distrito Federal.

LAFHAJ, Z., GOUEYGOU M., DJERBI A., KACZMAREK M. (2006) *Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content*. Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 4, Pages 625-633, ISSN 0008-8846.

LU, Y., YANG, B., GREGG, D., SADDLER, J. N., & MANSFIELD, S. D. (2002) *Cellulose adsorption and an evaluation of enzyme recycle during hydrolysis of steam-exploded softwood residues*. Applied biochemistry and biotechnology, 98(1-9), 641-654.

MALAISKIENE, J. et al. (2018) *The impact of primary sludge from paper industry on the properties of hardened cement paste and mortar*. Construction and Building Materials, v. 172, p. 553-561.

MALAISKIENE, J. et al. (2019) *The effect of dried paper-mill sludge on cement hydration*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v.138, p. 4107-4118.

MARLIERE, E., MABROUK, M., LAMBLET, P. (2012) *How water retention in porous media with cellulose ethers works*. Cement Concr. Res., 42 (11) (2012), pp. 1512-1529.

MAROUSEK, J., HASKOVA S., ZEMAN R. ZAK J. VANÍCKOVA R. MAROUSKOVA

A., VACHAL J. MYSKOVA J. (2015) *Techno-economic assessment of processing the cellulose casings waste*. Clean Technol. Environ. Policy, 17 (8), pp. 2441-2446.

MARTINS R.O.G., ALVARENGA R.C.S., PEDROTI L.G., OLIVEIRA A.F., MENDES B.C., AZEVEDO A.R.G. (2018) *Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test*. Construct. Build. Mater., 129 (20), pp. 261-268.

MARVILA, M.; ALEXANDRE, J.; Rangel, A. A. G.; ZANELATO, E.; MONTEIRO, S. N.; DELAQUA, G.; AMARAL, L. (2017) *Estudo da Capilaridade para Argamassas de Múltiplo uso*. Anais do Congresso Anual da ABM, v. 72, n. 1.

MATA, R. A. (2016) *Efeitos do Lixiviado de Cinzas de Precipitadores Eletrostáticos de Caldeiras de Recuperação no Tratamento Biológico de Efluentes de Indústrias de Polpa Celulósica Kraft*. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Viçosa, MG - Universidade Federal de Viçosa (UFV).

MATTANA, A.J., MEDEIROS, M.H.F., SILVA, N.G., COSTA, M.R.M.M. (2012) *Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 63-79.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2014) *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON.

MIRANDA, R. E. S. (2008) *Impactos Ambientais Decorrentes dos Resíduos Gerados na Produção de Papel e Celulose*. Monografia em Engenharia Florestal, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ.

MODOLO, R.C.E., et al., 2014. *Lime mud from cellulose industry as raw material in cement mortars*. Mater. Construcción 64 (316).

MOORE, D., ROBSON, G. D., & TRINCI, A. P. (2011) *21st century guidebook to fungi with CD*. Cambridge University Press.

MYMRIN V.A., ALEKSEEV K.P., CATAI R.E., IZZO R.L.S., ROSE J.L., NAGALLI, A. ROMANO C.A. (2015) *Construction material from construction*

and demolition debris and lime production wastes. Construct. Build. Mater., 79, pp. 207-213.

MYMRIN, V. et al. (2020) *Efficient application of cellulose Pulp and paper production wastes to produce sustainable construction materials*. Construction and Building Materials, v. 263, p. 120604.

NOVAIS, R. M.; CARVALHEIRAS, J.; SENFF, L.; LABRINCHA, J. A. (2018) *Upcycling unexplored dregs and biomass fly ash from the paper and pulp industry in the production of eco-friendly geopolymer mortars: A preliminary assessment*. Construction and Building Materials, v. 184, p. 464–472.

OLIVEIRA. H. A.; CUNHA. E. S.; GIBBO. R. M.; BRESSIANI. J. C. (1999) *Aproveitamento de resíduo do processo de fabricação de papel em massas de revestimento cerâmico tipo semi grés*. 32º Congresso Anual de Celulose e Papel, São Paulo.

O'SULLIVAN, A. C. (1997). *Cellulose: the structure slowly unravels*. Cellulose, 4(3), 173-207.

PALONEN, H. (2004) *Role of lignin in the enzymatic hydrolysis of lignocellulose*. VTT Technical Research Centre of Finland.

PANDINI, N. T. (2019) *Influência da Relação Mássica CaO/SiO₂ nas Propriedades Tecnológicas de Argamassas à base de Cinza Volante Álcali-ativada com Cal Virgem*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes, RJ – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

PIOTO, Z. (2003) *Eco-eficiência na indústria de celulose e papel*. Tese de Doutorado em Engenharia – Universidade de São Paulo, São Paulo.

RAMACHANDRAN, V.S., PAROLI, R.M., BEAUDOIN, J.J. and DELGADO, A.H. (2002) *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. William Andrew Publishing/Noyes, Norwich, 491-530.

RAMALHO, M. A.; CORRÊA, M. R. S. (2003) Projeto de edifícios de alvenaria estrutural, 1.ed. São Paulo.

RITTER, S.K. (2008) *Lignocellulose: A complex biomaterial*. Chemical and Engineering News. v.86, n.49, p. 10-15.

RODRIGUES. L. R.; FRANCISCO. M. A. C. O.; SAGRILLO. V. P. D.; LOUZADA. D. M.; ENTRINGER. J. M. S. (2016) *Caracterização de resíduos sólidos da indústria de celulose tipo kraft visando sua aplicação no desenvolvimento de materiais cerâmicos*. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharias e Ciências dos Materiais, Natal.

SANTIAGO E. I.; ANDRADE A. V. C; PAIVA-SANTOS C. O.; BULHÕES L. O. S. (2003) *Structural and electrochemical properties of LiCoO₂ prepared by combustion synthesis*. Solid State Ionics, 158 (2003), pp. 91-102.

SANTOS, H. B. (2008) Ensaio de aderência das argamassas de revestimento. Curso de Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. (1965) *An analysis of variance test for normality (complete sample)*. Biometrika, Great Britain, v. 52, n. 3, p. 591-611.

SILVA, A. S. (2018) *Dolomitic lime: the past and present*. Ambient. constr. [online], vol.18, n.4, pp.63-73. ISSN 1678-8621.

SOARES, D. R. (2018) Economia Circular na Indústria de Celulose tipo Kraft: aproveitamento de resíduos dregs e grits. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro, RJ – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ).

TRAJANO, H. L., & WYMAN, C. E. (2013) *Fundamentals of biomass pretreatment at low pH*. Aqueous pretreatment of plant biomass for biological and chemical conversion to fuels and chemicals, 103-128.

TUKEY, J.W. (1949) *Comparing Individual Means in the Analysis of Variance*. Biometrics, 5, 99-114.

VASHISTHA P., KUMAR V. (2020) *Paper Mill Lime Sludge Valorization as Partial Substitution of Cement in Mortar*. Emerging Technologies for Waste Valorization and Environmental Protection. Springer, Singapore.

WADSÖ, L., WINNEFELD, F. RIDING, K. SANDBERG, P. (2016) Calorimetry. In K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Eds.), *A Practical Guide to Microstructural Analyses of Cementitious Materials* (pp. 37-74)

WOLFF, E. (2008) 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 em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte.

ZHAO, X.; ZHOU, Y.; LIU, D. (2012) *Kinetic model for glycan hydrolysis and formation of mososaccharides during dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse*. Bioresource Technology, v.105, p. 160-168.