XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Avaliação exploratória da trabalhabilidade de pastas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição

Exploratory evaluation of the workability of lime pastes with metakaolin and construction and demolition waste

Silvandro Ferreira de Siqueira Júnior
UFPE | Recife | Brasil | silvandro.ferreira@ufpe.br
Aline Figueiredo Nóbrega
UFCG | Campina Grande | Brasil | aline.figueiredo@professor.ufcg.edu.br
Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
UFPE | Recife | Brasil | arnaldo.carneiro@ufpe.br

Resumo

O presente estudo tem por finalidade a avaliação da trabalhabilidade de pastas compostas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição (RCD) com vistas a viabilizar uma futura utilização de um novo material de construção civil sustentável. A metodologia empregada foi a medida do espalhamento obtida através de ensaios com o mini-slump onde foram realizadas misturas que incorporam até 50% em massa de resíduo de construção e demolição com 4 relações água/ligante distintas. Os resultados obtidos evidenciam a possibilidade de substituição de até 30% em massa de cal com metacaulim por RCD em pastas com relação água/ligante de 0,8 e 0,9.

Palavras-chave: Construção sustentável. Resíduos de construção e demolição. Cal. Metacaulim. Trabalhabilidade.

Abstract

The present study aims to evaluate the workability of pastes composed of lime with metakaolin and construction and demolition waste (CDW) to enable a future use of a new sustainable building material. The methodology used was the measurement of the scattering obtained through tests with mini slump where mixtures were carried out that incorporated up to 50% by mass of construction and demolition waste with 4 different water/binder ratios. The results obtained show the possibility of replacing up to 30% by mass of lime with metakaolin by CDW in pastes with water/binders ratio of 0,8 and 0,9.

Como citar:
SIQUEIRA JÚNIOR, S. F.; NÓBREGA, A. F.; CARNEIRO, A. M. P. Avaliação exploratória da trabalhabilidade de pastas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Keywords: Sustainable construction. Construction and demolition waste. Lime. Metakaolin. Workability.

INTRODUÇÃO

Antes do advento do cimento Portland em meados do século XIX, predominavam as construções cujo principal material ligante era a cal [1]. Além disso, estudos realizados nas últimas décadas retratam que, no passado, diferentes pozolanas eram incorporadas à cal com o objetivo de incrementar e aprimorar características construtivas, o que incluía a resistência e durabilidade da construção [2][3]. Consequentemente, diversos estudos na atualidade buscam analisar e identificar propriedades de pastas e argamassas com diferentes proporções de cal e pozolanas de forma a serem utilizadas na restauração de monumentos históricos, os quais necessitam de materiais compatíveis com o original para que o reparo seja vantajoso no curto, médio e longo prazo, tendo em vista que o emprego de outros materiais como o cimento Portland gera manifestações patológicas nessas estruturas [4-9].

Ainda conforme estes autores, dentre as principais pozolanas utilizadas em combinação com a cal destaca-se o metacaulim, o qual vem sendo sistematicamente investigado com o intuito de se obter o melhor desempenho de sua adição à cal cuja reação química entre ambos gera silicato de cálcio hidratado (C-S-H) dentre outros componentes oriundos dessa reação pozolânica. Após a análise das pesquisas [4, 9, 10-12], foi constatado que a proporção mais utilizada entre esses dois materiais (Cal e Metacaulim) foi a de 1:1 em massa, o qual sempre apresentou resultados satisfatórios. Além disso, a razão água/ligante utilizada por parte dos autores na literatura variou de 0,8 a 1,3 [13], também em massa, tendo em vista a elevada finura dos materiais em questão, a qual exige uma maior demanda de água para viabilizar a hidratação do material.

Os estudos, com o objetivo de adicionar o RCD em misturas que possuam a cal como um dos componentes, a fim de reduzir o consumo deste ligante tradicional, são incipientes até o presente momento. Como o RCD representa cerca de 25 – 30% do total de resíduos descartados ao redor do mundo, é importante estudos para a sua utilização isoladamente ou em combinação com ligantes aéreos ou hidráulicos. Reutilizá-lo, constitui-se como uma das formas do setor da construção civil cooperar com a mitigação dos iminentes impactos ambientais previstos para as próximas décadas [14].

Consequentemente, de maneira a contribuir com essa urgente demanda, o presente estudo se propõe a avaliar a trabalhabilidade de pastas compostas de cal com metacaulim e resíduos de construção e demolição com o intuito de contribuir com a viabilização de mais uma alternativa de material sustentável para uso e aplicação.

METODOLOGIA

MATERIAIS, PROPORÇÕES E RELAÇÃO ÁGUA/LIGANTE

Os materiais utilizados neste estudo foram: cal hidratada tipo CH-I, em conformidade com a NBR 7175 (2003) [15]; Metacaulim comercial do tipo HP Ultra, oriundo da Metacaulim do Brasil; Resíduo de construção e demolição, oriundo da empresa Ciclo Ambiental, a qual trabalha no tratamento do RCD e está localizada em Camaragibe-PE.

Por possuir uma granulometria incompatível para uso como ligante, tendo em vista que o resíduo de construção e demolição coletado na empresa Ciclo Ambiental não foi alvo de nenhuma triagem, foi necessária a realização da moagem do RCD de maneira que fossem empregadas nas misturas apenas as partículas passantes na peneira de 0,075mm.

A moagem do RCD foi realizada com base na metodologia desenvolvida pelo grupo de pesquisa de construção civil "*Estudo e Aplicação de Tecnologia de Materiais para o Desenvolvimento do Ambiente Construído"*, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE, que trabalha com RCD de maneira a se obter uma distribuição de tamanho de partículas adequada para seu uso e aplicação, em que considera o RCD como material híbrido, com propriedades pozolânicas ou inertes.

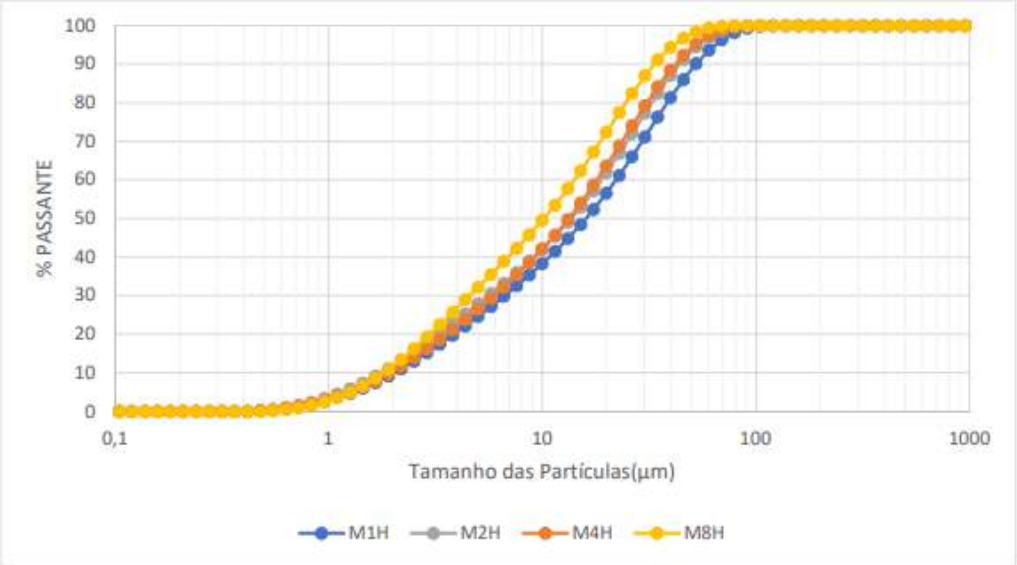
Este procedimento tem como princípio não fazer a triagem do RCD, diferentemente do que é feito corriqueiramente nas pesquisas. Consequentemente, as partículas do resíduo de construção e demolição coletado na usina contêm uma considerável variedade de natureza (alvenaria, cerâmica, agregados e ligantes no estado endurecido) e de dimensões.

Em laboratório, o resíduo de construção e demolição foi submetido a um tratamento inicial de tamanho das partículas, onde foi realizado o seu peneiramento, para submeter à moagem apenas as partículas de RCD passantes na peneira de 0,600mm.

Posteriormente, as partículas de RCD passantes na peneira de 0,600mm foram submetidas a moagem em um moinho de bolas pelo tempo de 2 horas. Este moinho possui volume de 15,9 litros e dimensões de 30x26cm, além de corpos moedores (esferas de porcelana) com 3 dimensões distintas: 55 esferas com 35mm de diâmetro; 139 esferas com 20mm de diâmetro; e 288 esferas com 13mm de diâmetro.

Por sua vez, a escolha do tempo de moagem levou em consideração o estudo [16], o qual evidencia que a moagem do resíduo de construção e demolição, após tratamento inicial de tamanho de partículas, pelo tempo de 2 horas é o suficiente para se obter uma distribuição granulométrica onde aproximadamente 100% das partículas são passantes na peneira de 0,075mm, conforme pode ser visualizado no gráfico 01.

Gráfico 1: distribuição granulométrica acumulada do resíduo.



Nota: M2H – Moagem por 2 horas. Fonte: [16].

A finura da cal hidratada, do metacaulim e do RCD (após moagem) foram determinadas através do método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), normatizado pela NBR 16372 (2015) [17]. Além disso, a massa específica desses 3 materiais foi determinada através do ensaio com o frasco volumétrico de Le Chatelier, conforme preconiza a NBR 16605 (2017) [18]. Os resultados obtidos para cada um dos materiais empregados na mistura estão compilados na tabela 1.

Tabela 1: Finura e massa específica da cal hidratada, do metacaulim e do RCD.

Material	Finura	Massa específica
Cal hidratada	1433,37 m²/Kg	2,26 g/cm³
Metacaulim	584,78 m²/Kg	2,67 g/cm³
Resíduo de construção e demolição	568,69 m²/Kg	2,59 g/cm³

Fonte: os autores.

Para a realização da análise da composição química dos materiais com perda ao fogo, inicialmente, a amostra de cada um dos materiais foi seca em estufa a 110°C. Em seguida, uma porção de cada amostra seca foi levada a uma mufla a 1000°C por 2 horas para a determinação de perda ao fogo enquanto outra porção da mesma amostra seca foi prensada em cápsula de alumínio com 30 toneladas de força. As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados foram recalculados para 100% para incorporar a perda ao fogo e estão expressos em peso %, conforme pode ser visualizado na tabela 2.

Tabela 2: Composição química dos materiais com perda ao fogo (valores em %).

-	Cal hidratada	Metacaulim	RCD
CaO	72,25	0,21	9,10
SiO_2	1,06	58,37	64,27
Al_2O_3	0,19	24,16	7,69
K_2O	0,27	0,29	1,64
P_2O_5	0,20	0,39	0,62
MgO	0,65	0,15	0,74
SrO	0,15	-	0,03
Fe_2O_3	0,10	2,03	2,27
TiO_2	0,04	1,72	0,61
MnO	0,01	0,01	0,04
SO_3	0,08	0,03	0,69
Na_2O	-	-	0,50
Cr_2O_3	-	0,02	0,06
NiO	-	-	0,02
ZnO	-	0,01	0,01
Rb_2O	-	-	0,01
ZrO_2	-	0,07	0,08
BaO	-	-	0,09
PbO	-	0,01	-
Perda ao fogo	25,00	12,52	11,53

Fonte: os autores.

A definição das proporções utilizadas nas misturas da cal hidratada com metacaulim e resíduo de construção e demolição levou em consideração a revisão de literatura onde foi constatado que uma das proporções de cal-metacaulim mais adotada pelos pesquisadores ao longo das últimas duas décadas foi a de 1:1 em massa entre ambos os componentes [4][9][10][11][12], razão pela qual essa proporção foi adotada como referência.

Tendo em vista a inexistência de estudos que visem adicionar o RCD em misturas de cal com pozolanas, foi definido que esta avaliação exploratória seria realizada com a substituição em massa de cal com metacaulim por RCD de 10 em 10% até o limite de 50% de substituição em massa. A relação água/ligante possuiu 4 variações: 0,8; 0,9; 1,0 e 1,1. Foi utilizada água deionizada para a realização de todas as misturas, de maneira a evitar que outros compostos fossem formados durante a hidratação do material anidro por influência de íons presentes na água. No total, 24 misturas foram realizadas (Tabela 3).

Tabela 3: Misturas realizadas.

Água/Ligante	Misturas					
0,8	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
0,9	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
1,0	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
1,1	Referência	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD

Fonte: os autores.

MÉTODOS

Após a obtenção de cada material, foi realizada a homogeneização de cada uma das proporções estipuladas em um equipamento denominado misturador Y (Figura 1) pelo tempo de 10 minutos, o qual possui velocidade de rotação de 50 rpm.

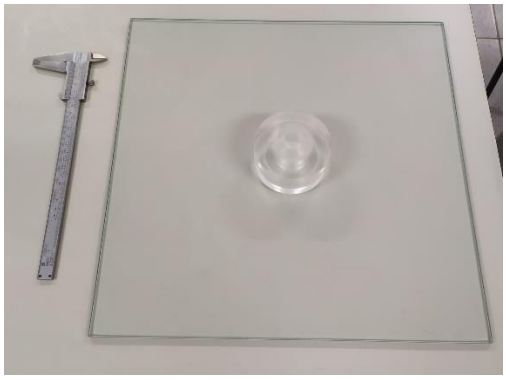
Figura 1: Misturador Y.



Fonte: os autores.

Para a realização da medição dos espalhamentos foi utilizado o método do minicone de Kantro [19], também conhecido como mini-slump (Figura 2). Ele foi apoiado sobre uma placa de vidro e as medições eram realizadas com um paquímetro após o levantamento do minicone.

Figura 2: Minicone, paquímetro e placa de vidro.



Fonte: os autores.

O procedimento de preparação das amostras, das misturas e dos ensaios tomou por base o descrito em [20] onde foram realizadas algumas adaptações tendo em vista que o ligante testado foi a mistura Cal-Metacaulim ou Cal-Metacaulim-RCD.

Em síntese, o procedimento adotado para a preparação das misturas foi o seguinte:

1 – Pesagem de 200 gramas do ligante; 2 – Pesagem da água deionizada utilizando um béquer 250ml (razões água/ligante de 0,8; 0,9; 1,0 e 1,1); 3 – a placa de vidro foi posicionada sobre uma mesa com nível cuidadosamente verificado e com o minicone posicionado no centro da placa; 4 - Mistura manual, com o auxílio de uma espátula, do ligante com a água, pelo tempo cronometrado de 1 minuto; 5 – Mistura da pasta pelo tempo de 2 minutos em um misturador mecânico RW 20, IKA, com hélice naval de 50mm (Figura 3) com velocidade de rotação de 1600 rpm; 6 - logo após a mistura no mixer, foi realizada uma mistura manual pelo tempo de 15 segundos.

Figura 3: Misturador mecânico.



Fonte: os autores.

Por sua vez, o procedimento realizado para o ensaio foi o seguinte: 1 – Imediatamente após as misturas realizadas, o minicone foi preenchido com a pasta e em seguida foi rasado com o auxílio de uma espátula; 2 – dez batidas foram dadas no topo do minicone antes de levantá-lo rapidamente, com a finalidade de melhorar o adensamento; 3 – após o levantamento do minicone, dois diâmetros foram medidos, com o auxílio de um paquímetro, em direções perpendiculares e a média desses valores foi calculada para se obter o valor do espalhamento; 4 – a placa de vidro e o minicone foram limpos com água, enxutos e posicionados para o ensaio seguinte.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos espalhamentos obtidos através do ensaio de mini-slump no presente estudo para as misturas de referência, 100 gramas de cal hidratada e 100 gramas de metacaulim, e das demais misturas com a substituição de 20, 40, 60, 80 e 100 gramas de cal-metacaulim por RCD correspondendo a 10, 20, 30, 40 e 50% de substituição, respectivamente, para as 4 relações água/ligante empregadas, foram compiladas na tabela 4.

Tabela 4: Espalhamentos obtidos.

Água/Ligante	**Espalhamentos (em milímetros)**					
-	REFERÊNCIA	10% RCD	20% RCD	30% RCD	40% RCD	50% RCD
0,8	58,43	68,43	83,49	**95,93**	117,26	137,34
0,9	79,75	**99,91**	114,92	130,58	143,56	159,50
1,0	**97,15**	121,54	141,54	153,33	172,78	178,10
1,1	126,48	147,92	157,81	171,72	185,67	187,11

Fonte: os autores.

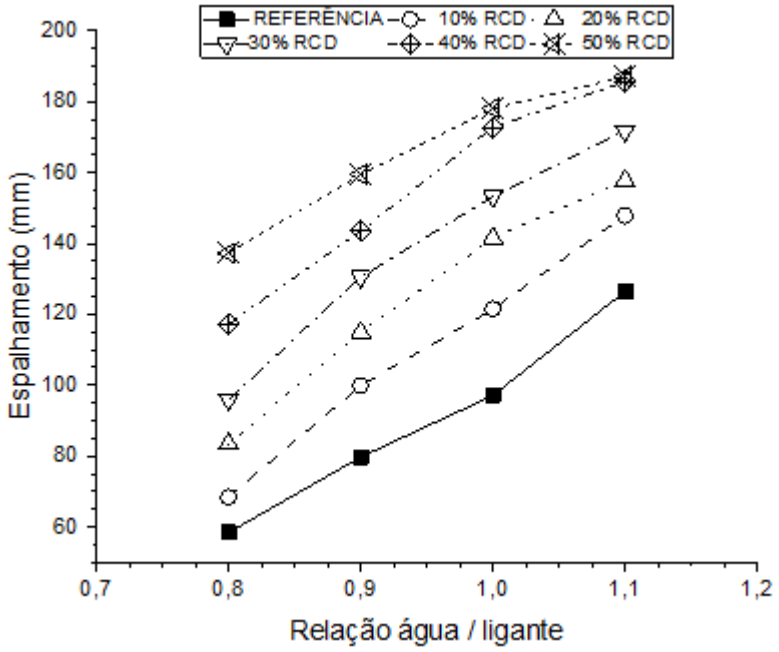
Da análise da tabela 4, é possível identificar que quanto maior o nível de substituição de Cal-Metacaulim por RCD, maior se torna o espalhamento obtido. Esse espalhamento foi potencializado com o aumento da razão água/ligante empregada na mistura, o qual atingiu a média de 187,11mm na mistura com 50% de substituição por RCD e água/ligante de 1,1.

Diante disso, pode-se observar que há uma tendência de que o RCD possua menor absorção de água que o sistema cal-metacaulim, o que provavelmente ocorre pelos seguintes motivos: o incremento de RCD diminui gradativamente o teor de cal-

metacaulim da mistura, o que reduz as reações pozolânicas iniciais que consomem água; o RCD pode não possuir a mesma reatividade da cal-metacaulim quando em contato com a água. Esses motivos podem ser a justificativa para o aumento da fluidez e consequente redução da viscosidade das pastas, sendo necessárias maiores investigações para ratificá-los.

O gráfico 2 apresenta a curva de espalhamento de cada percentual de substituição de cal-metacaulim por RCD, incluindo as misturas de referência, em função da relação água/ligante empregada.

Gráfico 2: plasticidade das misturas em função da relação água/ligante.



Fonte: os autores.

Por ser um material com elevada finura (área superficial específica) [21], a cal hidratada exige uma demanda de água superior ao metacaulim e ao RCD. Quando combinada unicamente com o metacaulim, essa demanda de água diminui. Tomando por base algumas pesquisas que utilizaram a relação água/ligante de 1,0, quando foram confeccionadas misturas de cal com metacaulim [4][9][22], e analisando a tabela 4 e o gráfico 2, é possível identificar que os espalhamentos das misturas contendo 30% de RCD na relação água/ligante de 0,8 (95,93mm) e a mistura com 10% de RCD na relação água/ligante de 0,9 (99,91mm) não apresentam discrepância superior a 3% quando comparados individualmente com o espalhamento obtido pela mistura de referência com relação água/ligante de 1,0 que foi de 97,15mm. Consequentemente, estudos mais aprofundados, tomando por base esse experimento, podem identificar um padrão e viabilizar a produção de um novo material de construção sustentável com consistência e características semelhantes a materiais usualmente empregados no restauro e manutenção de edificações históricas.

CONCLUSÕES

Haja vista a urgente necessidade de estudos que garantam o uso e aproveitamento do RCD com segurança nos componentes da construção civil com a finalidade de mitigar os iminentes impactos ambientais previstos para as próximas décadas, tendo em vista a sua elevada produção que corresponde a um patamar de 25 – 30% de todo resíduo descartado ao redor do mundo, foi realizado o presente estudo com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade de misturas que incorporam RCD em substituição parcial a um ligante comumente empregado na restauração e conservação do patrimônio histórico (Cal com metacaulim). Em consequência, foram obtidas as seguintes conclusões:

Inicialmente, tendo em vista que a escolha criteriosa dos materiais empregados é um fator que influencia nos resultados obtidos, o uso de uma cal hidratada de elevada pureza juntamente com um metacaulim com reatividade adequada, assim como um RCD cominuído, através de moagem, de forma a obter uma finura e características compatíveis, no mínimo, com o metacaulim são aspectos relevantes a serem levados em consideração ao se planejar desenvolver pastas e argamassas com esses componentes.

Por sua vez, foi identificado através dos ensaios realizados com o mini slump que o espalhamento de misturas com algumas porcentagens de RCD nas razões água/ligante de 0,8 e 0,9 são compatíveis com a mistura de cal com metacaulim comumente empregada que é de 1,0, o que realça a necessidade de maiores investigações em aspectos microestruturais dos materiais empregados e suas diferentes misturas, assim como aspectos reológicos e macroestruturais de pastas e argamassas confeccionadas com esses componentes.

Por viabilizar uma maior incorporação de RCD, o emprego da razão água/ligante de 0,8 apresenta-se como o mais promissor nas misturas ternárias, tendo em vista que mesmo a substituição de 30% em massa de cal com metacaulim por RCD propiciou praticamente a mesma consistência da mistura de referência com a utilização de água/ligante de 1,0. Portanto, as misturas com razão água/ligante de 0,8 com um teor de substituição de até 30% de RCD foram escolhidas pelos autores para a realização de estudos futuros.

REFERÊNCIAS

[1] SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars. **Journal of the European Ceramic Society**, 27 (2-3), p. 1735-1741, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.155.

[2] CINCOTTO, M. A.; QUARCIONI, V. A.; JOHN, V.M. Cal na construção civil. In: Geraldo C Isaia. (Org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2007, v.1, p. 695-726.

[3] VELOSA, A. L. P. L. **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas**. 2006. 467 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

[4] DE AZERÊDO, A. F. N. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais** . 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

[5] SOUZA, J. S. C. **Estudo de argamassas à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas**. 2013. 228 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

[6] SOUZA, J. S. C. **A influência do metacaulim na cristalização das hidrogranadas nas pastas de cal**. 2019. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

[7] AGGELAKOPOULOU, E.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic masonries. **Applied Clay Science**, v. 53, n. 1, p. 15 – 19, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.005.

[8] DE AZERÊDO, A. F. N.; STRUBLE, L. J.; CARNEIRO, A. M. P. Microstructural characteristics of lime-pozzolan pastes made from kaolin production wastes. **Materials and Structures/Materiaux et constructions**, v. 58, n. 7, p. 2123 – 2132, 2015. DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-014-0297-4.

[9] SALES, L. P. B. **Cinética de endurecimento, microestrutura e reologia de pastas de cal-metacaulim com agentes aceleradores**. 2022. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.

[10] GAMEIRO, A.; et al. Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: influence of binder:aggregate ratio. **Cement and concrete composites**, v. 45, p. 264 – 271, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.010.

[11] PAPAYIANNY, I.; STEFANIDOU, M. Strenght-porosity relationships in lime-pozzolan mortars. **Construction and Building materials**, v. 20, n. 9, p. 700 – 705, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.012.

[12] VELOSA, A. L.; ROCHA, F.; VEIGA, R. Influence of chemical and mineralogical composition of metakaolin on mortar characteristics. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, v. 6, n. 1, p. 121 – 126, 2009.

[13] ARANDIGOYEN, M.; et al. Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 5, p. 1449 – 1459, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.145.

[14] ROBAYO-SALAZAR, R. A.; VALENCIA-SAAVEDRA, W.; GUTIÉRREZ, R. M. Construction and Demolition Waste (CDW) – Recycling as Both Binder and Aggregates – In Alkali-Activated Materials: A Novel Re-Use concept. **Sustainability**, v. 12(14), 5775, 2020. DOI: https:// doi.org/10.3390/su12145775.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

[16] GÓES, P. B. B. **Estudo da utilização do pó reciclado híbrido em matrizes cimentícias e sua influência na passivação do aço**. 2019. 113 f. Projeto de Qualificação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

[19] WEDDING, P.; KANTRO, D. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – A Miniature Slump Test. **Cement, concrete and aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95, 1980.

[20] AÏTCIN, P-C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.

[21] RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

[22] BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E.; MOROPOULOU, A.; ANAGNOSTOPOULOU, S. Evaluation of pozzolanic activity and physicomechanical characteristics in metakaolin-lime pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 84, n. 1, p. 157 – 163, 2006.