

Interferência da relação água/cimento nas propriedades tecnológicas de argamassas no estado endurecido
(Interference of the water / cement ratio in the technological properties of mortars in the hardened state)

Marvila, M.T.^{1,2*}; Azevedo, A.R.G.^{1,2}; Zanelato, E.B.¹; Alexandre, J.¹; Xavier, G.C.¹; Espirito Santo, T.L.¹; Cerqueira, N.A.²; Bruzzi, G.¹; Pirovane, T.¹.

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 28013-602

²Centro Universitário Redentor - UNIREDENTOR
BR 356, Itaperuna, RJ, Brasil, 27054-054.

*markssuel@hotmail.com

Resumo

A relação água/cimento é um parâmetro de extrema importância para concretos produzidos com cimento Portland, porém é uma propriedade negligenciada e deixada de lado quando se trata de argamassas. As Leis de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinari, consagrada na aplicação de concretos, ainda não foram devidamente testadas em argamassas. Em função disso o objetivo desse trabalho foi avaliar a interferência da relação água/cimento em argamassas, utilizando diferentes traços, 1:1:6, 1:2:9 e 1:3, e diferentes tipos de cimento, CP-II-E e CP-III. Foram realizados ensaios de consistência com três valores de referência diferentes, de e resistência à compressão aos 14 e 28 dias para verificação das validades das leis destacadas. Além disso foram realizados ensaios de absorção de água por imersão e porosidade em parte dos traços estudados. Os resultados comprovam que a relação água/cimento interfere consideravelmente nas propriedades estudadas e que as Leis de Abrams, de Molinari e de Lyse são comprovadas, embora com certas restrições.

Palavras chave: relação água/cimento, argamassas, estado endurecido.

Abstract

The water / cement ratio is an extremely important parameter for concretes produced with Portland cement, but it is a neglected and neglected property when it comes to mortars. The Laws of Abrams, Lyse's Law and Molinari's Law, enshrined in the application of concrete, have not yet been properly tested on mortars. The objective of this work was to evaluate the interference of the water / cement ratio in mortars, using different traces, 1: 1: 6, 1: 2: 9 and 1: 3, and different types of cement, CP-II-E and CP-III. Consistency tests were performed with three different reference values, and compressive strength at 14 and 28 days to verify the validity of the highlighted laws. In addition, immersion and porosity water absorption tests were performed in part of the studied traces. The results show that the water / cement ratio considerably interferes with the properties studied and that the Abrams, Molinari and Lyse Laws are proven, albeit with certain restrictions.

Keywords: water / cement ratio, mortars, hardened state.

INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios, feitos à base de cimento Portland, são muito utilizados na construção civil. Subdividem-se em concreto, produzidos com cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita), podendo ter ainda ter adições químicas e minerais; e em argamassas, confeccionadas com algum aglomerante (cimento, cal hidratada e/ou gesso), agregado miúdo e água, podendo conter também outras adições. Embora apresentem similaridades quanto a composição, existem muitas diferenças na aplicação dos dois materiais: o concreto usualmente é aplicado em funções estruturais, podendo ser também utilizado para vedação; as argamassas apresentam aplicações muito variadas, indo desde assentamento de blocos, revestimento, contrapiso, rejunte ou para assentamento de material cerâmico, até funções estruturais quando utilizada como argamassa de reforço [1-4].

O estudo do concreto e suas propriedades é muito difundido, já apresentando grandes avanços no cenário da engenharia civil. Porém o estudo das argamassas e suas propriedades ainda carecem de maior atenção no meio científico. Importantes leis físicas, como a Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinari, são aplicadas de maneira consagrada no estudo de concreto, porém nunca foram testadas quanto a sua aplicabilidade em argamassas.

A Lei De Abrams, por exemplo, correlaciona a resistência à compressão com o fator água/cimento necessário para dosagem de concreto [5-6]. Abrams demonstrou baseando-se em pesquisas laboratoriais que a resistência do concreto (f_c) dependia das propriedades da pasta de cimento endurecida, a qual por sua vez, era uma função direta do fator água/cimento (a/c) [6-7]. Assim, ele propôs uma equação, apresentada a seguir (eq.1) para relacionar essas duas propriedades:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (1)$$

onde:

K_1 e K_2 = parâmetros que dependem do tipo de cimento utilizado, idade de cura, tipos de agregados, entre outros.

Já a Lei de Lyse determina que para concretos com as mesmas características de consistência e fabricados com os mesmos materiais, a quantidade total de água por unidade de volume é constante, independente do traço analisado. Isso leva a conclusão de que para um certo conjunto de materiais (cimento, areia, brita e água), mantido constante o abatimento do concreto, o traço bruto nomeado por m é linearmente proporcional à relação a/c [8-9]. Dessa forma, a Lei de Lyse pode ser expressa pela (eq.2):

$$m = K_3 + K_4 * a/c \quad (2)$$

onde:

K_3 e K_4 = parâmetros representativos de um conjunto particular de materiais (cimento e agregados).

m = relação agregados secos por cimento.

Por fim a Lei de Molinari, relaciona o consumo de cimento por m^3 de concreto (C) com o traço bruto (m), desde que seja fixado o mesmo abatimento para os concretos estudados [8-9]. Dessa maneira, a Lei de Molinari pode ser matematicamente descrita por (eq. 3):

$$C = \frac{1000}{K_5 + K_6 * m} \quad (3)$$

onde:

K_5 e K_6 = parâmetros representativos de um conjunto particular de materiais (cimento e agregados).

Dessa maneira observa-se que as três leis detalhadas no texto anterior correlacionam importantes propriedades de concreto com o fator a/c , um dos principais parâmetros de dosagem para essa classe de materiais. Porém, não existem evidências científicas encontradas na bibliografia de que essas três expressões são válidas para argamassas. Esse é objetivo desse trabalho: verificar como as propriedades das argamassas relacionam-se entre si através de aplicação das leis de Abrams, Molinari e Lyse.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para confecção das argamassas foram utilizados dois tipos de cimento Portland brasileiros, CP-II-E-32 e CP-III-32. Além disso foram utilizados areia natural extraído do Rio Paraíba do Sul em Campos dos Goytacazes- RJ com $D_{máx} = 2,4\text{mm}$ e cal hidratada tipo CH-III.

Foram confeccionadas argamassas na proporção em massa 1:1:6 e 1:2:9 (cimento: cal hidratada: areia) e 1:3 (cimento: areia). Além disso, foram utilizadas duas quantidades diferentes de água definidas para cada traço com base na consistência obtida pelo ensaio normatizado pela NBR 13276 [10]. Os valores de consistência utilizados foram de 260 ± 5 mm, recomendado pela norma brasileira para argamassas de revestimento e assentamento de bloco e utilizadas em diversas pesquisas com esse tipo de aplicação para argamassas [11-13]. Além disso outros dois valores de consistência foram utilizados no estudo: 200 ± 5 mm extraído da bibliografia internacional [14] tomando como base argamassas aplicadas em reforço estrutural e 320 ± 5 mm escolhido para que as argamassas apresentassem fluidez excessiva. Com base na consistência as argamassas foram definidas como SECA (200 mm), NORMAL (260 mm) e FLUIDA (320 mm) e as quantidades de água para cada proporção foi definida, conforme indicado na Tabela 1 que também apresenta a nomenclatura dos traços avaliados.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão em corpos de prova (CP's) cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura conforme NBR 5739 [15] aos 14 e 28 dias utilizando 3 corpos de prova para cada traço descrito na Tabela 1. Os corpos de prova foram rompidos em uma máquina de ensaios universal EMIC com 30kN de capacidade com taxa de carregamento do ensaio foi de 500 ± 10 N/s até a ruptura do CP.

Além disso foram realizados ensaios de absorção de água por imersão e porosidade em corpos de prova prismáticos 40x40x160 mm após 28 dias de cura, conforme NBR 9778 [16], sendo utilizados três corpos de prova para cada composição avaliada. Esse ensaio foi estudado apenas nos traços 13IISECO, 13IINORMAL E 13IIFLUIDO.

Em todos os ensaios descritos a cura dos corpos de prova foi realizada ao ar ambiente com temperatura padrão de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Tabela 1 – Traços utilizados no estudo

Argamassas	CP-II-E	CP-III	CH-III (cal)	Areia (areia)	Água (a/c)
116SECO	1	-	1	6	1,33
116NORMAL	1	-	1	6	1,60
116FLUIDO	1	-	1	6	1,92
129SECO	1	-	2	9	1,75
129NORMAL	1	-	2	9	2,20
129FLUIDO	1	-	2	9	2,80
13IISECO	1	-	-	3	0,50
13IINORMAL	1	-	-	3	0,70
13IIFLUIDO	1	-	-	3	0,88
13IIISECO	-	1	-	3	0,53
13IIINORMAL	-	1	-	3	0,72
13IIIFLUIDO	-	1	-	3	0,87

Por fim destaca-se que para obter o consumo de cimento de cada traço de argamassa foi necessário obter a densidade de massa das composições estudadas no estado fresco conforme NBR 13278 [17]. Assim, através da eq. 4 foi possível obter o valor do parâmetro C:

$$C = \frac{d * 1000}{1 + \text{areia} + \text{cal} + a/c} \quad (4)$$

onde:

d= densidade da argamassa no estado fresco em g/cm³.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerações Gerais:

As quantidades de água obtidas para que as argamassas apresentassem os valores de consistência nomeados como seca (200 ± 5 mm), normal (260 ± 5 mm) e fluida (320 ± 5 mm) são apresentados na Tabela 1.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos para as argamassas estudadas.

Argamassas	a/c	m	d (g/cm ³)	C (kg/m ³)	f _{c14} (MPa)	f _{c28} (MPa)
116SECO	1,33	6	1,98	212,22	3,12 ± 0,14	4,67 ± 0,26
116NORMAL	1,60	6	2,03	211,46	2,50 ± 0,22	4,19± 0,34
116FLUIDO	1,92	6	2,07	208,67	2,04 ± 0,18	3,71± 0,15
129SECO	1,75	9	1,91	138,91	2,45 ± 0,09	4,22 ± 0,17
129NORMAL	2,20	9	1,97	138,73	2,12 ± 0,12	3,65± 0,26
129FLUIDO	2,80	9	2,02	136,49	1,56 ± 0,15	1,98 ± 0,11
13IISECO	0,50	3	1,69	375,56	9,12 ± 0,32	13,86 ± 0,42
13IINORMAL	0,70	3	1,72	365,96	8,64 ± 0,24	12,43 ± 0,34
13IIFLUIDO	0,88	3	1,75	358,61	8,02 ± 0,37	11,37 ± 0,21
13IIISECO	0,53	3	1,67	371,11	9,27 ± 0,15	14,23 ± 0,19
13IIINORMAL	0,72	3	1,71	380,00	8,94 ± 0,19	13,15 ± 0,27
13IIIFLUIDO	0,87	3	1,76	391,11	8,53 ± 0,31	12,86 ± 0,22

Com base nessas quantidades de água e com base nas proporções em massa para cada traço, também presentes na Tabela 1, foi possível calcular os principais parâmetros indicados nas eq. 1, 2 e 3 com o intuito de estudar as correlações apresentadas pelas Leis de Abrams, Molinari e Lyse, respectivamente. Esses parâmetros (m, C, a/c) são indicados na Tabela 2. Nessa mesma tabela são apresentados os valores de resistência à compressão

obtidos aos 14 e 28 dias (f_{c14} e f_{c28}), sendo incluídos os valores das médias experimentais para cada composição com seus desvios padrões. Na mesma tabela também são incluídos os valores de densidade das argamassas no estado fresco que possibilita o cálculo do consumo de cimento. É válido destacar que para obtenção das constantes presentes nas eq. 1,2 e 3 (K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 e K_6) e para validação das leis apresentadas serão considerados apenas os valores das médias de resistência obtidos no ensaio de compressão, de forma similar ao que é feito no estudo de concreto. Assim, nesse trabalho não foi realizado nenhum tratamento estatístico ou teste de contraste de médias, principalmente porque não está sendo realizado a avaliação da incorporação de nenhum resíduo.

Lei de Abrams:

A Figura 1 apresenta as curvas de Abrams obtidas para todos os traços avaliados, aos 14 e aos 28 dias de cura. São indicados na figura os valores de K_1 e K_2 para cada um dos traços das argamassas, bem como o valor de R^2 . Tomando como base esse último parâmetro, inclusive, é possível identificar que o menor valor encontrado foi de 0,9341 para o traço 1:2:9 aos 28 dias. Os altos valores de regressão exponencial obtidos, comprovam que de fato as argamassas obedecem a Lei de Abrams, e que existe uma relação direta entre a/c e a resistência à compressão do material.

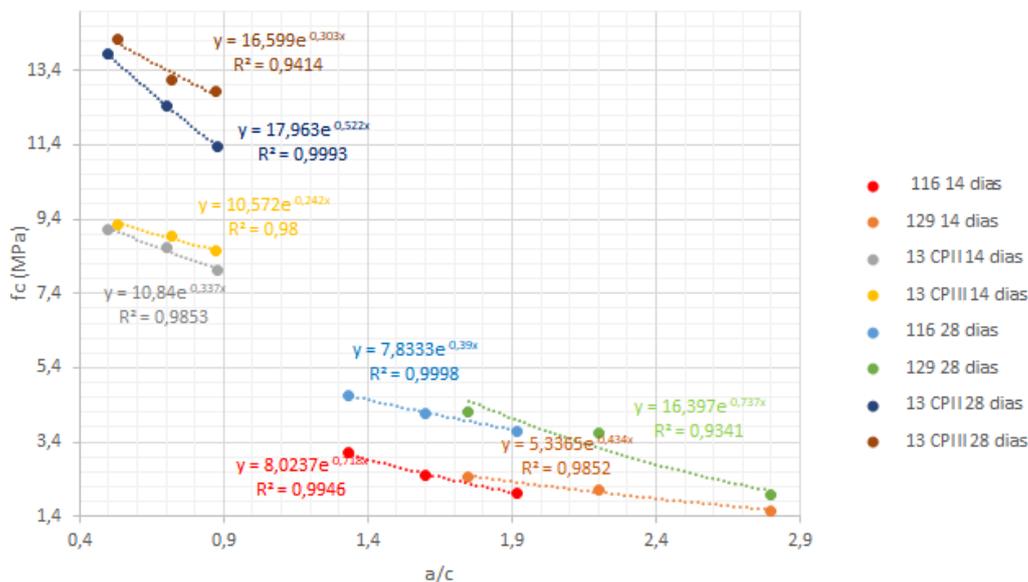


Figura 1 – Curvas de Abrams para as argamassas estudadas.

Lei de Lyse e Molinari:

A Figura 2 apresenta a curva de Lyse para as argamassas estudadas. Novamente observa-se que os valores de R^2 obtidos indicam que a relação proposta pela Lei de Lyse, entre m e a/c , é altamente aplicável no estudo de argamassas da mesma forma que é aplicada no estudo de concreto.

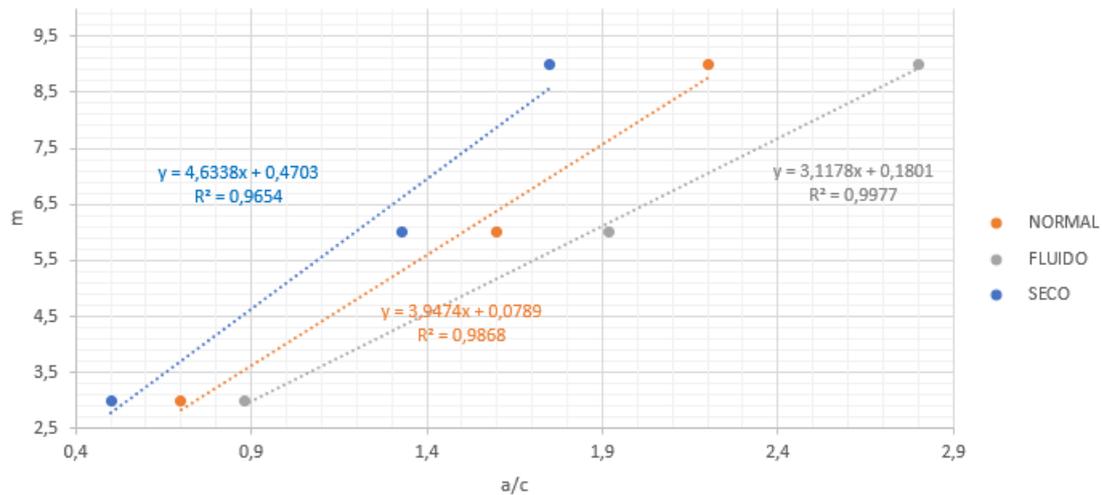


Figura 2 – Curvas de Lyse para as argamassas estudadas.

A Figura 3 apresenta a curva de Molinari para as argamassas estudadas. Os valores de R^2 obtidos indicam que a relação proposta no gráfico apresenta boa correlação. Porém os valores obtidos não expressam corretamente a Lei de Molinari. Isso ocorre por causa da dificuldade matemática encontrada na eq. 3, que diferente das eq. 1 e 2, não apresenta uma função simples de ser representada. As eq. 1 e 2 apresentam equações exponenciais e lineares, respectivamente. A eq. 3, por sua vez, apresenta uma função inversa complexa que, conforme visto na Figura 3, deve ser simplificada para ser corretamente aplicada em argamassas. Isso sugere, portanto, que a Lei de Molinari pode ser utilizada no estudo de argamassas, porém ao contrário do que ocorre em concreto, a aplicação da lei deve ser simplificada matematicamente. Outra dificuldade que pode ser destacada é o cálculo do consumo de cimento (C) que diferente dos outros parâmetros não pode ser obtido diretamente, necessitando antes do cálculo da densidade das argamassas no estado fresco.

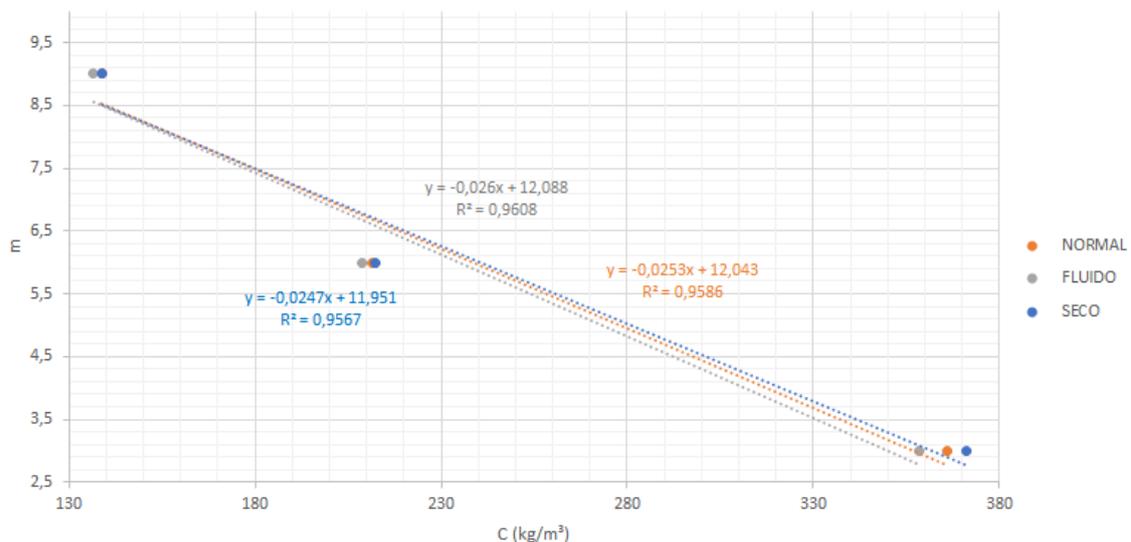


Figura 3 – Curvas de Molinari para as argamassas estudadas.

Absorção de água e porosidade:

A Figura 4 apresenta os valores de absorção de água e de porosidade, para o traço 1:3 com CP-II-E. Esse traço foi escolhido por apresentar em sua composição apenas cimento e agregado. Conforme é facilmente observado pelos altos valores de regressão obtidos na figura, as propriedades de absorção de água e porosidade apresentam elevada relação com o fator a/c. Esse fato já foi reportado pela bibliografia para concretos [18-19] e também é verificado para argamassas. A explicação para o padrão de resultados obtidos é o seguinte: quanto maior a quantidade de cimento na argamassa, e conseqüentemente menor o valor a/c, maior o calor de hidratação liberado durante a hidratação do material. O maior calor de hidratação provoca aparecimento de fissuras e surgimento de poros internos no material, que contribui para o aumento da porosidade e da absorção de água obtidas pelas composições com maiores teores de cimento.

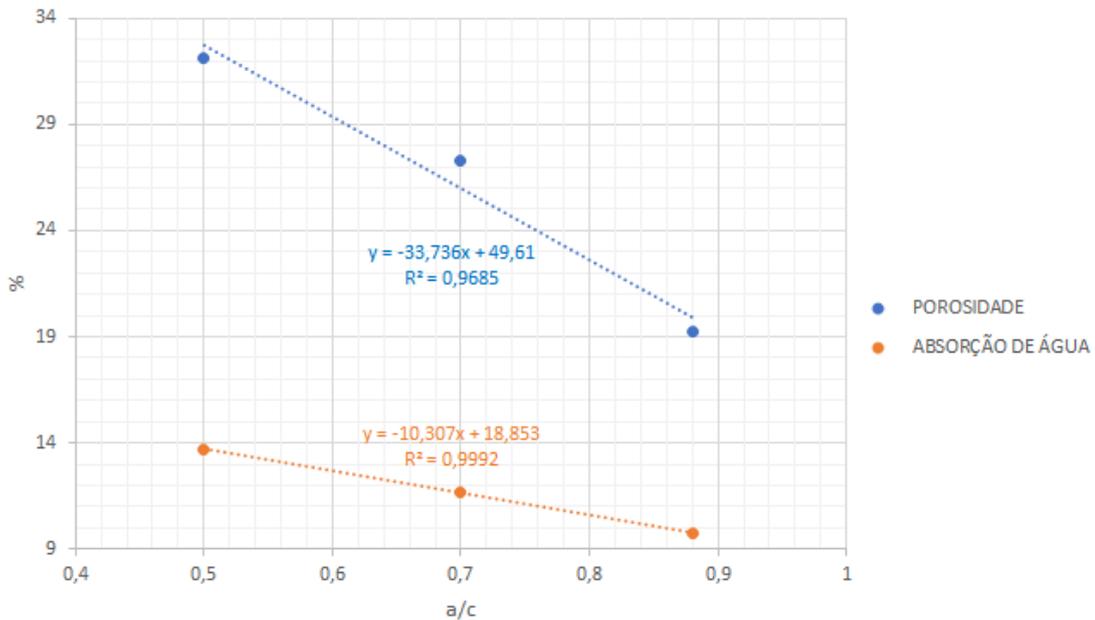


Figura 4 – Absorção de água e porosidade para argamassa 1:3 CP-II-E.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos foi possível verificar que as Leis de Abrams e Lyse podem ser aplicadas no estudo de argamassas da mesma forma como são aplicados aos estudos do concreto.

A Lei de Molinari, entretanto, por ter maior dificuldade em sua implementação matemática deve ser aplicada no estudo de argamassas com maiores restrições. Outra dificuldade encontrada na aplicação dessa lei é a mensuração do consumo de cimento em argamassas (C) que exige o estudo da densidade do material no estado fresco.

Ficou comprovado também através dos resultados obtidos que o parâmetro a/c é um dos mais importantes no estudo de materiais cimentícios, quer seja concreto ou quer seja argamassas conforme estudado nesse artigo. Isso foi comprovado através da relação entre a/c e os valores de resistência à compressão (Lei de Abrams), entre os valores m (Lei de Lyse) e entre os valores encontrados para absorção de água e porosidade estudados para a argamassa 1:3 (cimento CP-II-E: areia).

REFERÊNCIAS

- [1] M.A. Haque, R.A. Chowdhury, S. Islam, M.F. Islam, H. Rahman. Evaluating the conventional mixing grades of demolished tiles aggregate concrete and mortar for sustainable use. *Journal of Cleaner Production*. Volume 213, p. 1414-1427, 2019.
- [2] S. C. Yaragal, S.N.B. Gowda, C. Rajasekaran. Characterization and performance of processed lateritic fine aggregates in cement mortars and concretes. *Construction and Building Materials*. Volume 200, p. 10-25, 2019.
- [3] A.M. Ghrair, O.A. Al-Mashaqbeh, M.K. Sarireh, N. Al-Kouz, M. Farfoura, S. B. Megdal. Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes. *Ain Shams Engineering Journal*. Volume 9, p. 1519–1525, 2018.
- [4] Z. Zhao, M. Benzerzour, N.E. Abriak, D. Damidot, L. Courard, D. Wang. Use of uncontaminated marine sediments in mortar and concrete by partial substitution of cement. *Cement and Concrete Research*. Volume 93, p. 155-162, 2018.
- [5] G.A. Rao. Generalization of Abrams' law for cement mortars. *Cement and Concrete Research*. Volume 31, p. 495-502, 2001.
- [6] T.S. Nagaraj, Z. Banu. Generalization of Abrams' law. *Cement and Concrete Research*. Volume 26, p. 933-942, 1996.
- [7] L.K.A. Sear, J. Dews, B. Kite, F.C. Harris, J.F. Troy. Abrams law, air and high water-to-cement ratios. *Construction and Building Materials*. Volume 10, p. 221-226, 1996.
- [8] L. Cabral, E. Monteiro, P. Helene. Análise comparativa do Módulo de elasticidade calculado segundo diferentes Normas. *Revista ALCONPAT*, Volume 4, Número 2, p. 144 – 160, 2014.
- [9] A.A.M. Santos, M.B. Leita. Avaliação de concretos reciclados com agregado graúdo de concreto dosados pelo método da ABCP modificado. *Ambiente Construído*, Volume 18, Número 4, p. 341-359, 2018.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, NBR 13276, Rio de Janeiro, 2012.

- [11] M.N. Kurz, T.M. Brandelli, C.M. Paliga, A.S. Torres. A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas. *Matéria*, v.23, n.3, 2018
- [12] H. Carasek, A. C. C. Girardi, R. C. Araújo, R. Angelim, O. Cascudo. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. *Cerâmica*, Volume 64, p. 288-300, 2018.
- [13] A.P.S. Milani, F.G.R. Dias. Physical-mechanical performance criteria of cement-soil mortars for earth building coating. *Ambiente Construído*, Volume 18, n. 2, p. 133-142, 2018.
- [14] J.M.F. Mota, R.A. Oliveira, A.M.P. Carneiro. Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria. *Matéria*, Volume 21, n. 4, p. 1105–1116, 2016.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, NBR 9778, Rio de Janeiro, 2009.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, NBR 5738, Rio de Janeiro, 2007.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa no estado fresco e do teor de ar incorporado, NBR 13278, Rio de Janeiro, 2005.
- [18] L.Y.G. Zamorano, G.G. Guillén, J.L.A. Dávila. Estudio de la hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolín: efecto del empleo de dos aditivos superplastificantes. *Revista ALCONPAT*, Volume 5, Número 3, p. 203 – 218, 2015.
- [19] C.M. Rojas, M.A. Cincotto. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos na hidratação do cimento Portland. *Ambiente Construído*, Volume 13, n. 3, p. 267-283, 2013.