

BALANÇO DE CARGAS ENTRE ARGILA CAULÍNICA E CALCÁRIO PARA DOSAGEM DE ARGAMASSAS*

Markssuel Teixeira Marvila¹

Jonas Alexandre²

Afonso Rangel Garcez de Azevedo³

Euzébio Bernabé Zanelato⁴

Sergio Neves Monteiro⁵

Melissa de Almeida Goulart⁶

Thais Miguel Pirovane⁷

Giovanni Bruzzi Guarçoni⁸

Luís Carlos da Silva⁹

Resumo

Baseado no estudo das argamassas primitivas, que apresentavam em sua composição materiais argilosos e rocha calcária, foi avaliada a possibilidade do balanço de cargas entre esses dois materiais para dosagem de argamassas. Foram confeccionadas argamassas na proporção 1:1:6 (cimento: cal hidratada: areia) como traço de referência e também com substituição da cal hidratada por proporções definidas em mol de calcário e argila, produzindo as argamassas EST1:1, EST2:1, EST1:2, EST3:1 e EST1:3. Foram avaliadas as propriedades de consistência, resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, densidade de massa no estado endurecido e índice de vazios. Os resultados comprovam que o balanço de cargas entre os dois materiais em estudo ocorre entre as proporções 2:1 e 3:1, indicando que essa é a relação em mol do balanço de cargas entre a argila caulínica e o calcário avaliados.

Palavras-chave: Argamassas; Calcário; Argila Caulínica; Balanço de Cargas.

BALANCE OF LOADS BETWEEN CAULINIQUE CLAY AND CALCARY FOR DOSAGE OF MORTARS

Abstract

Based on the study of the primitive mortars, which presented clay and limestone materials in their composition, the possibility of load balancing between these two materials for dosing of mortars was evaluated. Mortars were prepared in the proportion 1: 1: 6 (cement: hydrated lime: sand) as reference and with the replacement of hydrated lime by proportions defined in mole of limestone and clay, producing mortars EST1: 1, EST2: 1, EST1: 2, EST3: 1 and EST1: 3. The properties of consistency, mechanical strength, water absorption by capillarity, mass density in the hardened state and voids index were evaluated. The results show that the balance of loads between the two materials under study occurs between 2: 1 and 3: 1 proportions, indicating that this is the molar ratio of the load balance between kaolinite and limestone evaluated.

Keywords: Mortars; Limestone; Kaolinite Clay; Load Balancing.

¹ Engenheiro Civil, mestre em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

² Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Civil, doutor em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

- ⁴ *Engenheiro Civil, doutorando em Estruturas, LECIV, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁵ *Engenheiro Metalúrgico, PhD em Engenharia e Ciência dos Materiais, IME, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil*
- ⁶ *Estudante de engenharia civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁷ *Estudante de engenharia civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁸ *Estudante de engenharia civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.*
- ⁹ *Engenheiro Metalúrgico, doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, IME, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que as primeiras argamassas produzidas pelo homem levavam em sua composição misturas de solo barroso, material que pode ser considerado como argila, e materiais cálcicos provenientes de rochas calcárias, quimicamente semelhantes a carbonato de cálcio ou os demais compostos encontrados no ciclo da cal [1-2]. Portanto percebe-se que a composição das argamassas primitivas, produzidas antes da descoberta do cimento Portland que revolucionou a tecnologia das argamassas, era uma mistura de argila com calcário altamente estável e não suscetível a problemas patológicos. Estas argamassas primitivas, presente em obras de grande importância para a humanidade como as Pirâmides do Egito e o Coliseu Romano, apresentam parte de sua estrutura original até os dias atuais, demonstrando que apresentam excelentes desempenhos em serviço.

O histórico das primeiras argamassas, executadas com argila e calcário (carbonato de cálcio) como citado acima, é apresentado a seguir. Segundo Carvalho (2008) [2] e Matias (2014) [3] os primeiros usos de argamassas que se tem conhecimento datam de 14.000 a.C. na região da Mesopotâmia, onde essas argamassas eram utilizadas para assentamento de pedras e assentamento de tijolos de barro modelados manualmente. Tem-se conhecimento também de argamassas usadas para o assentamento de tijolos queimados na região do rio Nilo, Egito, por volta de 5.000 a.C. Inicialmente essas argamassas usavam como material aglomerante o barro (argila), e na sequência passaram a utilizar também uma argamassa mais resistente e durável, feita com uma composição de cal e argila. O uso do barro era indispensável, porque era esse material que proporcionava o parâmetro da trabalhabilidade que facilitava a execução dos serviços numa época em que a tecnologia das construções era bastante precária. Carvalho (2008) [2] e Schmid (2016) [4] destacam que foram os egípcios os primeiros a utilizarem a argamassa para revestimento e vedação, dando mais versatilidade ao uso desse material, e criando o conceito de argamassa de múltiplo uso, embora esse nome ainda não fosse usado na época. A civilização egípcia usava para assentamento das pedras de suas pirâmides (pirâmide de Queóps, construída por volta de 2.700 a.C.) e para revestimento em reboco das partes internas das antecâmaras argamassas compostas por gesso calcinado (uma espécie de cimento primitivo), misturado com quantidades controladas de barro. Essas obras executadas pelos egípcios encontram-se com suas estruturas em bom estado até os dias atuais, mesmo usando em sua composição argila, material que apresenta um histórico de grandes problemas patológicos conforme explicado anteriormente no texto. Elsen (2006) [1] e Carvalho (2008) [2] apresenta uma cronologia a respeito do avanço do uso das argamassas, que futuramente iriam avançar até se tornar o concreto como se conhece hoje. Ele destaca que após os avanços proporcionados pelos egípcios, foram os romanos que alavancaram a tecnologia de argamassas ao descobrir uma nova composição para esse material de construção, por volta de 200 a.C. Os romanos usavam um tipo de argamassa a base cal, cinza vulcânica e uma espécie de solo barroso. Com o tempo, a técnica foi aperfeiçoada e o solo barroso caiu em desuso. Schmid (2016) [4] destaca que foi com esse tipo de argamassa, apelidada de argamassa romana, que os romanos construíram suas principais obras, como por exemplo, o aqueduto Pont Du Gard, o Pantheon, o Fórum romano, o Coliseu, os famosos banhos romanos, a Basílica de Constantino, além de várias estradas e diversas outras construções, executadas entre 312 e 27 a.C. Schmid (2016) [4] explica ainda porque foi necessário readequar a composição das argamassas romanas, deixando de utilizar os materiais argilosos em sua composição. Segundo ele para

execução de obras como aquedutos, os banhos e as termas romanas eram necessários o uso de uma argamassa que além de resistente e de fácil conformação, fosse impermeável e estanque. Essas duas últimas propriedades só foram obtidas com o desuso do solo barroso, originalmente presente nas argamassas. Ainda segundo Carvalho (2008) [2] durante a idade média, toda tecnologia de uso de argamassa não sofreu grandes avanços, e o revestimento e assentamento de blocos dos castelos e construções da época eram feitos com os mesmos materiais deixados pelos romanos: misturas de cal e cinza vulcânica, contendo ou não o acréscimo de solo argiloso.

A partir do século XVIII, com o avanço da tecnologia do cimento, e da invenção do cimento Portland (mistura de argila e calcário queimados, e posterior acréscimo de gesso), as argamassas de múltiplo uso ganharam nova composição: cimento, areia e algum material que conferisse trabalhabilidade a essa mistura, em geral calcário (e mais recentemente cal hidratada) ou ainda solo argiloso. Recentemente alguns estudos têm sido realizados em argamassas medievais para identificação de sua composição através da microscopia óptica, como o estudo realizado por Conte (2017) [5]. Nesse estudo o pesquisador identificou a composição das fases minerais de diferentes argamassas presentes em um sítio histórico no Sul da Itália. Com base nas evidências históricas comprovou-se que as argamassas medievais (datadas dos séculos XVI – XVII) utilizavam como aglomerante carbonatos e solos argilosos. Já as argamassas mais novas, portanto chamadas de pós-medievais e datadas dos séculos XIX – XX apresentavam em sua composição um aglomerante com características mais próximas do cimento, sendo preenchidos por agregado silicatos (areia). Outro estudo realizado por García-Esparza (2017) [6] em argamassas de castelos medievais localizados na zona rural de Valência, na Espanha, comprovaram a tendência encontrada por Conde (2017) [5] para as argamassas medievais, uma vez que ao realizar a caracterização da composição dessas argamassas García-Esparza (2017) [6] comprovou que elas eram produzidas com barro, calcário e pequenas adições de gesso. As argamassas, extraídas de 200 construções distintas da região analisada, foram datadas do século XVII, mesmo período do trabalho de Conde (2017) [5]. Ao mesmo tempo em que argamassas contendo material argiloso eram utilizadas na Europa antiga, estudos realizados por pesquisadores sul-americanos constataram que este tipo de argamassa também era utilizado na América pré-colombiana. Aguilar (2017) [7] estudou as argamassas e os blocos utilizados na execução da obra Huaca de la Luna, situada no Peru, e construída por volta de 2600 a.C, mantendo parte de sua estrutura original em bom estado até os dias atuais. O pesquisador descobriu ao analisar a composição destas argamassas, utilizadas para assentamento e recobrimento (espécie de revestimento rudimentar) dos blocos de Huaca, que estas eram executadas utilizando material argiloso em sua composição. Ou seja, tanto na Europa antiga quanto na América do Sul pré-colombiana existem indícios de obras histórias executadas com argamassas de múltiplo-uso contendo em sua composição material argiloso. Wells (2010) [8] realizou estudo semelhante em testemunho de argamassas extraídas de fortes construídos no final do século XVII pelos europeus em Castillo de San Critóbal, em Porto Rico. O autor comprovou que a composição das argamassas analisadas era de predominantemente barro com características parecidas ao barro encontrado na ilha, e quantidades significativas de carbonato de cálcio, tendo ainda em sua composição outros materiais em menores proporções. Por fim, Figueiredo (2011) [9], analisando testemunhos de argamassas extraídas de patrimônios tombados do centro histórico de São Luís, no Maranhão, em obras executadas no início do século XVIII comprovou que predominava argila e material

calcário na composição dos materiais extraídos para estudo. Desta forma uma grande evidência é obtida quando todo este retrospecto é analisado: de fato as argamassas com argila apresentam problemas patológicos em função de sua microestrutura atômica. Porém existem evidências históricas e científicas de que argamassas produzidas com materiais argilosos (barro) e materiais carbonáticos (rocha calcária e cal hidratada) constituem estruturas altamente duráveis e com excelente desempenho em serviço, a ponto de manter parte da estrutura original centenas de anos após serem construídas.

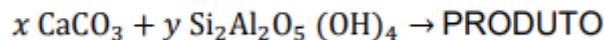
Diante desse contexto o objetivo desse trabalho foi verificar a possibilidade do uso de solo argiloso e calcário em argamassas como substituição da cal hidratada, usando para isso o balanço de cargas entre os dois materiais destacados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para produção das argamassas foram cimento Portland CP-II-E-32, cal hidratada CH-III, areia natural de rio, massa argilosa extraída da cidade de Campos dos Goytacazes, calcário proveniente de uma indústria de rocha ornamental de Cachoeiro de Itapemirim – ES.

As argamassas foram dosadas na proporção 1:1:6 (Cimento Portland: cal hidratada: areia), sendo confeccionado um traço de referência e traços com substituição da cal hidratada por proporções definidas de argila e calcário.

Essas proporções foram definidas da maneira a seguir: foram estipuladas as fórmulas teóricas dos dois materiais a serem analisados, a argila caulínica ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e a rocha calcária (CaCO_3), que reagiram conforme a expressão a seguir em relação mol e mol:



Conhecendo as fórmulas químicas dos dois compostos da reação foi possível calcular as massas molares dos dois compostos, utilizando as massas atômicas presentes na Tabela 1, o que resulta em 100,08 g/mol para o calcário (pó de mármore) e 240,12 g/mol para a argila caulínica. Variando x e y em proporções diversas, obteve-se os traços destacados na Tabela 2, que relaciona dessa forma as proporções molares dos aglomerantes estudados.

Para obter o traço em massa correspondente ao traço 1:1:6 foi necessário dividir a massa da argila pela soma das massas de argila e pó de mármore, chegando ao parâmetro “a” e a massa do resíduo por esta mesma soma, resultando no parâmetro “b”. Assim os traços foram indicados na proporção em massa 1:a:b:6 (cimento: argila: pó de mármore: areia natural) conforme observado na Tabela 2.

Os ensaios realizados nas argamassas em estudo foram: ensaio de consistência (NBR 13276: 2016 [10]), ensaio de resistência mecânica (NBR 13279: 2005 [11]), ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 15259: 2005 [12]), índice de vazios (NBR 9778: 2009 [13]) e densidade de massa no estado endurecido (NBR 13280: 2005 [14]).

Afim de verificar as diferenças estatísticas obtidas entre os traços estudados, foi realizado o Teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para contraste de médias. Esse teste consiste em calcular a menor diferença significativa e contrastar as médias dos tratamentos realizados, dois a dois, classificando médias iguais com um código representado pelas letras do alfabeto em sequência (A, B, C, ...). Traços com mesmas letras apresentam médias com equivalência estatística. Dessa forma foi possível verificar se o balanço de cargas proposto foi efetivo ou não, respaldado pelo Teste de Tukey para contraste de médias.

Tabela 1. Massa atômica dos elementos que compõe a argila caulínítica e a rocha calcária.

Elemento Químico	Massa Atômica (g)
H	1,00
O	16,00
Al	26,98
Si	28,08
Ca	40,08

Tabela 2. Traços obtidos pelo balanço de cargas.

Traço (x:y)	Mols de Pó de mármore (x)	Massa de Pó de mármore (g)	Mols de Argila (y)	Massa de Argila (g)	Proporção (cimento: argila: pó de mármore: areia)
EST1:1	1	100,08	1	240,12	1:0.71:0.29:6
EST1:2	1	100,08	2	480,24	1:0.83:0.17:6
EST2:1	2	200,16	1	240,12	1:0.55:0.45:6
EST1:3	1	100,08	3	720,36	1:0.88:0.12:6
EST3:1	3	300,24	1	240,12	1:0.44:0.56:6

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para os parâmetros avaliados são apresentados na Tabela 3, onde também é indicado a análise baseada no Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Os traços que apresentam a letra A correspondem aos tratamentos com melhores valores obtidos para cada parâmetro. Assim, por exemplo, é possível concluir que o traço de referência obteve o melhor desempenho em resistência mecânica, desempenho intermediário em índice de vazios e densidade de massa e o pior desempenho entre as argamassas avaliadas para absorção de água por capilaridade.

Os valores de consistência indicados representam o espalhamento encontrado para argamassas com relação água/materiais secos de 0,188, obtido para o traço de referência. É possível perceber que as proporções EST2:1 e EST3:1 mostraram-se mais trabalháveis do que o traço de referência, uma vez que o espalhamento obtido foi maior para essas proporções.

Quanto as demais propriedades avaliadas, observa-se a seguinte tendência: para a resistência mecânica os traços EST1:2 e EST1:3 provocaram prejuízos nesse propriedade, o que pode ser atribuído a piora na propriedade de trabalhabilidade proporcionada por essas argamassas; quanto a capilaridade todas as proporções avaliadas apresentaram redução nessa propriedade, o que pode ser atribuído ao balanço de cargas entre a argila e o calcário; sobre os índices de vazios deve-se desvalidar as proporções EST1:2 e EST1:3; e quanto a densidade de massa no estado endurecidos todas as proporções melhoraram ou mantiveram essa propriedade em comparação ao traço de referência. Todas essas conclusões são obtidas através da análise estatística proporcionada pelo Teste de Tukey.

Assim, o balanço ideal é obtido entre 2:1 e 3:1 mols de calcário e argila, aproximadamente, uma vez que essas proporções apresentaram bons parâmetros tecnológicos. Esse fato é comprovado analisando a classificação do Teste de Tukey, em que a proporção 2:1 apresentou índices A e AB para todos os ensaios realizados, bem como a proporção 3:1 que apresentou índices A em praticamente todas as propriedades, com exceção da densidade de massa em que ficou enquadrada na classe B.

Tabela 3. Resultados encontrados.

Traços	Consistência (mm)	Resistência Mecânica (MPa)	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	Índice de Vazios (%)	Densidade de massa (g/cm ³)
REF	260	4,35 A	1,65 C	26,88 B	1,83 B
EST1:1	248	4,17 A	1,38 B	27,57 B	1,71 AB
EST1:2	245	3,77 B	1,36 B	28,08 C	1,66 A
EST2:1	266	4,05 A	1,22 AB	25,59 AB	1,74 AB
EST1:3	244	3,58 B	1,37 B	27,71 BC	1,64 A
EST3:1	271	4,02 A	1,11 A	24,71 A	1,81 B

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade da utilização do procedimento de balanço de cargas entre o calcário e a argila caulinítica para dosagem em argamassas.

Foi comprovado que a balanço de cargas é obtido na relação 2:1 e 3:1 mols de calcário e argila, uma vez que essas duas proporções apresentaram os melhores resultados avaliados considerando as cinco propriedades estudadas, isto é, consistência, resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, índice de vazios e densidade de massa no estado endurecido. Esses resultados são respaldados estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para contraste de médias.

REFERÊNCIAS

- 1 ELSEN, J. (2006) Microscopy of historic mortars—a review, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1416–1424.
- 2 CARVALHO, J. D. N. (2008) Sobre as origens e desenvolvimento do concreto, *Revista Tecnológica*, v.17, p. 19-28
- 3 MATIAS, G., FARIA, P., TORRES, I. (2014) Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review, *Construction and Building Materials* 73, 125–136.
- 4 SCHMID, T., DARIZ, P. (2016) Chemical imaging of historical mortars by Raman microscopy, *Construction and Building Materials* 114, 506–516.
- 5 CONTE, A. M.; et al. (2017) Characterization of mortars from the medieval Abbey of Cerrate (southern Italy), *Journal of Archaeological Science: Reports*, v. 12, p. 463-479.

- 6 GARCIA-ESPARZA, J.A., PARDO, F., PALMERO, L.M. (2017) A multi-analysis characterization of medieval and vernacular coating mortars in rural Valencia (Spain), *Journal of Cultural Heritage*.
- 7 AGUILAR, R; MONTESINOS, M.; UCEDA, S. (2017) Mechanical characterization of the structural components of Pre Columbian earthen monuments: Analysis of bricks and mortar from Huaca de la Luna in Perú, *Case Studies in Construction Materials*, v.6, p. 16-28.
- 8 WELLS, J.C. (2010) CHARACTERIZATION OF THE MORTARS OF EL CASTILLO DE SAN CRISTOBAL, *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 49, No. 1, 27-44.
- 9 FIGUEIREDO, M.G., VARUM, H., COSTA, A. (2011) Caracterização das técnicas construtivas em terra edificadas no século XVIII e XIX no centro histórico de São Luís (MA, Brasil), *Arquitetura Revista*, Vol. 7, n. 1, p. 81-93.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009) Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro.
- 14 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.
- 15