# A RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO, O COEFICIENTE DE CAPILARIDADE, E A VARIAÇÃO DE MASSA DAS ARGAMASSAS MISTAS DE CAL E METACAULIM

**Tema:** Manutenção, reabilitação e restauro.
**Grupo:** 1

JULIANA SANTA CRUZ[1], FELISBELA M. DA C. OLIVEIRA[2], ARNALDO M. PEREIRA CARNEIRO[3]

[1]Doutoranda, Universidade Federal de Pernambuco/UFPE, julianascs@gmail.com
[2] Prof. Dr., Universidade Federal de Pernambuco /UFPE, felisbela.oliveira@ufpe.br
[3]Prof. Dr., Universidade Federal de Pernambuco /UFPE, ampc@ufpe.br

**RESUMO**
O trabalho comparou resistências à compressão, coeficientes de capilaridade, e a variação de massa de argamassas de cal e metacaulim como proposta para restauro em edificações históricas. As argamassas com os maiores teores de metacaulim tiveram uma maior relação água/material seco, um endurecimento e desmolde mais rápidos, e ganho de massa mais lento. Quanto maior o teor de metacaulim, maior foi o ganho de resistência mecânica e maior o coeficiente de capilaridade com o passar do tempo, exceto na argamassa E (20% de metacaulim). O estudo mostrou que tais argamassas têm acréscimo de resistência mecânica até os 60 dias e aumento do coeficiente de capilaridade, em razão das reações pozolânicas.

**Palavras-chave:** restauro, argamassa, resistência á compressão, capilaridade, variação de massa.

# THE RELATION BETWEEN COMPRESSIVE STRENGTH, CAPILLARY ABSORPTION COEFFICIENT AND MASS VARIATION OF MIXED LIME AND METAKAOLIN MORTARS

**ABSTRACT**
The work compared the compressive strengths, capillary absorpion coefficients and mass variation of lime and metakaolin mortars as proposed for restoration in historic buildings. The mortars with the highest metakaolin content had a higher water / dry material ratio, faster hardening and demolding, and a slower mass gain. The higher the metakaolin content, the greater the increase in mechanical strength, and higher the capillary absorption coefficient with the time, except in mortar E (20% of metakaolin). The study showed that these mortars have an increase of mechanical resistance up to 60 days and an increase in the capillary absorption coefficient due to the pozzolanic reactions.

**Key-words:** restoration, mortars, compressive strength, capillarity, mass variation

## 1. INTRODUÇÃO

As argamassas históricas são elementos sacrificais. Desta forma, são os primeiros elementos a se degradarem [1], necessitando de reparos ao longo do tempo. Doravante, já é sabido que em relação aos aglomerantes utilizados nas intervenções no patrimônio edificado, há ressalvas em relação ao uso do cimento Portland, tendo em vista a incompatibilidade do material com os materiais constituintes das obras históricas [2].

Diversos estudos trataram da adição de metacaulim em argamassas de cal para o restauro de edificações históricas [2,3,4,5]. Tais estudos mostram que há compatibilidade entre as alvenarias históricas e as características físico-químicas destas argamassas.

As argamassas tão somente de cal em intervenções em obras históricas possuem menor durabilidade à ação da água em relação às argamassas que possuem pozolana na constituição [6,7,8]. Espera-se que o comportamento das argamassas com adições pozolânicas, além de se enquadrarem no campo das necessidades restritas da conservação patrimonial, se revele superior ao das argamassas de cal sem adições, no que concerne à durabilidade [5].

Em relação ao comportamento mecânico, as argamassas de cal e metacaulim possuem capilaridade ascendente maior que as tão somente de cal. Quanto maior o teor de metacaulim, maior foi o coeficiente de capilaridade, como foi verificado no trabalho de Velosa [5]. Tal fato se deve possivelmente a uma maior necessidade de água para hidratação dos finos.

Em diversos estudos [1,2,9], as argamassas de cal e metacaulim detinham o mesmo comportamento de aumento gradual da resistência mecânica à compressão até aos 60 dias. Aggelakopoulou *et al.* [10] e Velosa [5] constataram o mesmo comportamento de um diminuto acréscimo da resistência mecânica até os 3 meses.

Este trabalho é parte da pesquisa de Souza [2], onde foi avaliado o teor de metacaulim nas propriedades mecânicas das argamassas, que pretende analisar a correlação entre a resistência mecânica, a absorção capilar e a variação de massa das argamassas de cal e metacaulim para o melhor entendimento de como funcionam estas argamassas mistas com vistas a serem utilizadas como argamassas de intervenção em obras históricas.

## 2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 2.1. Materiais e Caracterização

Na preparação das argamassas utilizaram-se dois tipos de agregado miúdo, cal hidratada CHII e adição de metacaulim. A proporção de agregado foi constante para todas as argamassas: 30% de areia fina e 70% de areia média. A areia fina possui dimensão máxima característica ($D_{máx}$) de 1,2 mm e módulo de finura 1,62. O agregado médio possui $D_{máx}$ de

4,8 mm e módulo de finura de 2,48. Os agregados foram colocados na estufa à temperatura de 100 - 105° C por 24 horas, sendo utilizado o material passante na peneira da série normal 4,75 mm.

A superfície específica da cal e do metacaulim são, respectivamente, 13,85 $m^2/g$ e 17,25 $m^2/g$, obtidas pelo método B.E.T. A análise química foi obtida por fluorescência de raio-x. A tabela 1 mostra a análise química e física da cal e metacaulim que compõe o estudo.

Tabela 1 – Composição química e física da cal e do metacaulim

| | MgO | $Al_2O_2$ | $SiO_2$ | $K_2O$ | CaO | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | P.F | S.E. ($m^2/g$) | M. E. ($g/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cal | 9,8 | 0,2 | 1,3 | 0,1 | 67,2 | 0,6 | -- | 20,6 | 13,85 | 2,24 |
| MK | 0,2 | 32,6 | 50,6 | 1,9 | 0,8 | 8,9 | 1,9 | 2,5 | 17,25 | 2,50 |

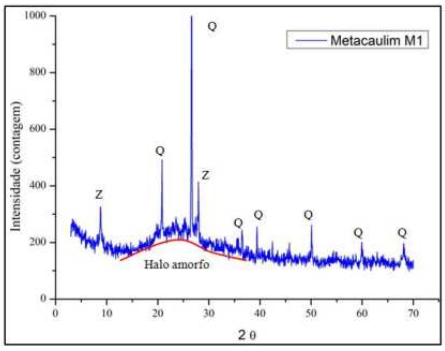
Legenda: P.F = perda ao fogo; M.E = massa específica; S.E = superfície específica; MK = metacaulim.

A cal apresentou alto teor de CaO e MgO, com os respectivos valores de 67,2 e 9,8%, e um elevado valor de perda ao fogo de 20,6% que pode ser atribuído à evaporação da água presente nos compostos hidratados, visto que, a portlandita se decompõe entre 500 - 550° C e a brucita entre 350 - 450° C. O teor de $SiO_2$ - sílica - é atribuído ao material inerte.

O metacaulim apresentou alto teor de $SiO_2$ e $Al_2O_3$, com os respectivos valores de 50,6% e 32,6%, e um percentual de 8,9% de $Fe_2O_3$. O teor de $Fe_2O_3$ é responsável pela coloração laranja do material pozolânico. O metacaulim apresentou um teor de perda ao fogo de 2,5%.

A figura 1 mostra a difratograma do metacaulim com o halo amorfo entre 15 – 35 graus, característico da sílica amorfa. Os compostos cristalinos identificados foram o quartzo e a zeonita.

Figura 1 – Difratograma do metacaulim




## 2.2. Procedimentos experimentais

### 2.2.1 Composição, moldagem, desmolde, e cura das argamassas

O estudo confrontou quatro traços de argamassa mista à base de cal hidratada, metacaulim e mistura binária de agregado miúdo, sendo 70% com areia média e 30% de areia fina para todos os traços. Foi mantida a proporção de ligante e agregado em volume constante 1:3. Para uma maior precisão dos cálculos, os traços foram transformados de volume para massa. A variação de um traço para outro foi a proporção de cal e metacaulim, sendo a cal substituída em massa por metacaulim nas seguintes porcentagens: 0%, 10%, 15% e 20%. A tabela 2 mostra a designação dos traços e as proporções de cal hidratada e metacaulim para cada traço. As argamassas foram moldadas aos 27°C e 80% de umidade, as mesmas utilizadas na cura.

Tabela 2 – Composição das argamassas em volume e em massa

| Argamassas | Materiais em volume | | | Materiais em massa (Kg) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cal | MK | M.B. | Cal | MK | A.F. | A.M. |
| A | 1 | 0 | 3 | 0,250 | 0 | 0,517 | 1,159 |
| C | 0,9 | 0,1 | 3 | 0,225 | 0,017 | 0,517 | 1,159 |
| D | 0,85 | 0,15 | 3 | 0,212 | 0,025 | 0,517 | 1,159 |
| E | 0,80 | 0,20 | 3 | 0,200 | 0,034 | 0,517 | 1,159 |

Legenda: M.B. – mistura binária = 30% A.F + 70% A.M; A.F. = areia fina; A.M. = areia média; MK = metacaulim

### 2.2.2 Ensaios no estado anidro, fresco e endurecido

Determinou-se a massa unitária dos traços de acordo com a NBR NM 45 [11], seguindo o método "C". A granulometria foi obtida pela norma NBR NM 248 [12]. A determinação da consistência das argamassas foi conforme a norma NBR 13276 [13]. O quantitativo de água foi definido para o espalhamento de 260 mm ± 10 mm constante para todas as argamassas. Tal trabalhabilidade foi em decorrência da cal proporcionar maior plasticidade as argamassas. A densidade de massa no estado fresco foi de acordo com a norma NBR 13278 [14].

O ensaio de variação de massa foi realizado na data de desmolde e teve duração de até 60 dias. O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 28 dias e aos 60 dias, foi determinado pela norma NBR 7215 [15]. A absorção de água por capilaridade das argamassas foi determinada nas idades de 30 e 60 dias, e seguiu a NBR 15259 [16]. As leituras foram efetuadas nos tempos de 0, 4, 10, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 90 e 100 minutos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

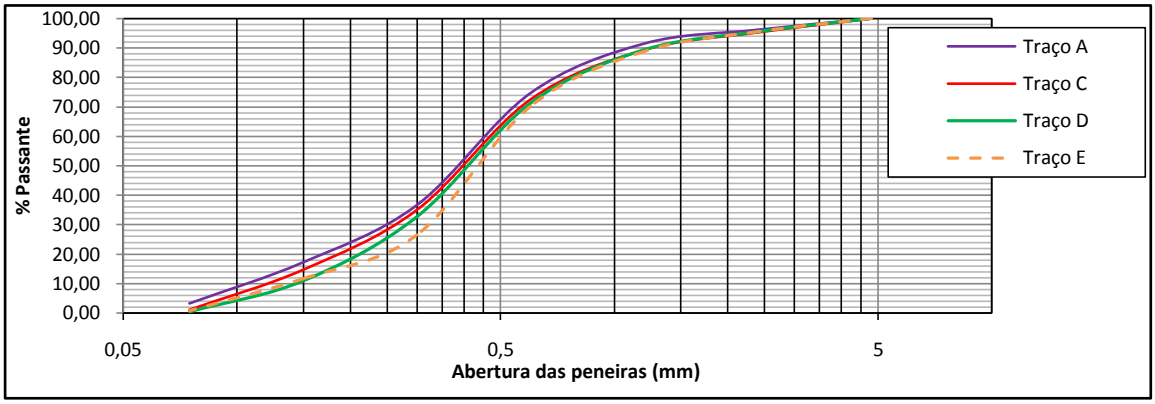
### 3.1 Ensaios no estado anidro

A argamassa A obteve menor valor de massa unitária de 1,389 kg/dm$^3$. Devido à pouca disparidade dos percentuais de metacaulim entre as argamassas estudadas, não houve

valores discrepantes nas massas unitárias das argamassas com metacaulim. As argamassas C e D tiveram o valor de 1,408 kg/dm$^3$, e a argamassa E o valor de 1,410 kg/dm$^3$. O que demonstra um empacotamento do sistema semelhante e que o teor acrescido de metacaulim não contribuiu significativamente na densidade de massa unitária no estado solto em virtude da finura e do quantitativo do material adicionado as argamassas.

As argamassas apresentaram curvas granulométricas uniformes. A variação na granulometria deu-se pelo teor de finos da cal hidratada e do metacaulim. O traço E obteve uma melhor distribuição granulométrica. A curva granulométrica da argamassa E obtive uma melhor distribuição das partículas retidas nas peneiras, tendo um melhor empacotamento do sistema no estado solto em relação aos demais traços (Ver Figura 2).

Figura 2 – Granulometrias dos traços no estado solto




### 3.2 Ensaios no estado fresco

O aumento do teor de metacaulim propiciou uma maior relação de água/material seco (A/MS) nas argamassas estudadas. Tal fato se deve ao maior teor de finos necessitar de um maior quantitativo de água para a molhagem de suas partículas.

A argamassa E teve a maior relação A/MS de 0,195, e foi desmoldada com 4 dias após a moldagem. A argamassa D foi desmoldada também com 4 dias, mas teve uma relação A/MS de 0,187. A argamassa C teve uma relação A/MS de 0,185 e foi desmoldada no quinto dia. A argamassa A apesar de ter a menor relação A/MS de 0,18, foi desmoldada no nono dia, em virtude da solidificação desta argamassa necessitar tão somente de gás carbônico ($CO_2$), e os moldes dificultaram a penetração do gás.

O teor de metacaulim contribuiu para a solidificação das argamassas apesar da necessidade de uma maior relação A/MS (Ver Tabela 4). O aumento no teor de finos acarretou na maior necessidade de água para envolver os grãos das partículas. Entretanto, foi necessário o uso da terceira casa decimal para determinar a trabalhabilidade desejada, em virtude de não haver grande disparidade nos teores de metacaulins nas argamassas.

Os resultados obtidos na densidade de massa no estado fresco foram muito semelhantes em virtude da pouca diferenciação do quantitativo nos teores de metacaulim das argamassas. Nas argamassas D e E, não houve diferença nos valores, o que demonstra que a densidade de massa no estado fresco não sofreu alterações mediante ao aumento de 5% de metacaulim na argamassa E. Os baixos valores dos desvios padrão da densidade de massa no estado fresco validam os resultados encontrados de densidade de massa (Ver Tabela 4).

Tabela 4 – Relação A/MS, período de desmolde, densidade de massa e o desvio padrão das argamassas

| Argamassa | A/MS | Desmolde ( dias) | Densidade de massa | Desvio Padrão (S) |
|---|---|---|---|---|
| A | 0,18 | 9 | 2,00 | 0,01 |
| C | 0,185 | 5 | 2,03 | 0,01 |
| D | 0,187 | 4 | 2,04 | 0,017 |
| E | 0,195 | 4 | 2,04 | 0,015 |

### 3.3 Ensaios no estado endurecido

No ensaio de variação de massa, até o 3° dia, todas as argamassas tiveram perda de massa crescente. Quanto menor o teor de metacaulim, maior a perda de massa que é decorrente da perda por evaporação da água de amassamento [2]. As argamassas com menores teores de metacaulim, apesar de terem sido moldadas com uma menor relação A/MS, tiveram uma maior perda de água de amassamento nas primeiras idades.

Do 20° ao 27° dia, todas as argamassas apresentaram o comportamento de lento e gradativo de ganho de massa, exceto a argamassa E que continuou a perder massa. As argamassas C e D tiveram um ganho mais discreto de massa do que a argamassa A. Do 27° ao 60° dia, as argamassas C e D continuaram a ganhar massa lentamente. A argamassa E continuou com seu comportamento de perda de massa (Ver Figura 4).

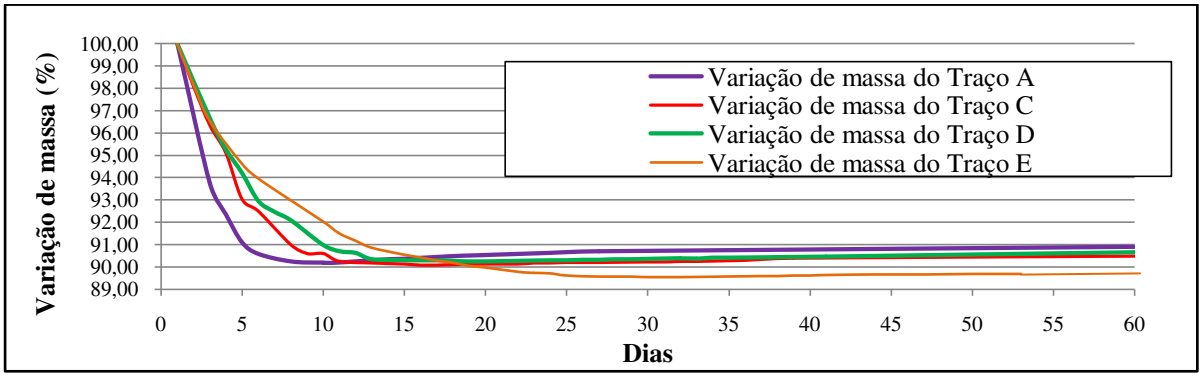
O ganho gradativo de massa é explicado pela reação do hidróxido de cálcio com o ar que ocorre lentamente, com a formação de $CaCO_3$ em substituição a 1 mol de $H_2O$ por 1 mol de $CO_2$. Visto que o hidróxido de cálcio (que possui massa molecular de 57,085 MM) ao se carbonatar passa a ter massa molecular de 66,088 MM (Ver equação 1). Desta forma, a carbonatação provoca ganho de massa lento nas argamassas ricas em cal.

$$Ca(OH)_{2_{(s)}} \xrightarrow{(CO_2)_{(g)}} CaCO_{3_{(s)}} + H_2O_{(g)} \qquad (1)$$



ISSN 1984-8757

Figura 4 - Variação de massa das argamassas no decorrer de 60 dias após o desmolde




O ensaio de capilaridade mostrou que o teor de metacaulim influenciou no aumento da absorção da água por capilaridade ascendente, demonstrando o aumento da porosidade das argamassas dosadas. Aos 30 dias de idade, quanto maior o teor de metacaulim maior o coeficiente de capilaridade. Aos 60 dias de idade, o comportamento se mantém, com exceção da argamassa E que obteve um valor do coeficiente inferior as demais argamassas com metacaulim. A argamassa A manteve praticamente o coeficiente constante, enquanto que a argamassa E teve um decréscimo do coeficiente de capilaridade (Ver Tabela 5). Os resultados das argamassas de metacaulim estão em concordância com os estudos de Velosa [5], onde a adição mineral elevou o coeficiente de capilaridade.

As argamassas C e D com teores de 10% e 15% de metacaulim, respectivamente, necessitaram de um maior de teor de água para a mesma trabalhabilidade que a argamassa A. Com o avançar da idade, a água de amassamento evaporou proporcionou poros capilares, elevando a porosidade, e que foi demonstrado pelo maior coeficiente de capilaridade nas argamassas C e D.

Em relação às resistências mecânicas, a argamassa A teve um ganho de resistência contínuo dos 28 aos 60 dias, que foi respectivamente, de 1,24 e 1,62 MPa. As argamassas C e D também tiveram um acréscimo na resistência mecânica aos 60 dias. A argamassa E passou de 0,97 aos 28 dias para 1 MPa aos 60 dias, um acréscimo diminuto de resistência. As argamassas com metacaulim tiveram um comportamento semelhante com ganho de resistência à compressão aos 60 dias, que foram na seguinte ordem crescente C < D < E (Ver Tabela 5).

Velosa [5] observou um acréscimo diminuto das resistências mecânicas à compressão até os 60 dias. Aggelakopoulou *et al.* [10] constataram o aumento na resistência à compressão até os três meses de idade nas argamassas de cal e metacaulim.

Os resultados de resistência deste trabalho, estão de acordo com os que foram referenciados por Veiga [17] para argamassas de restauro de 0,4 a 2,5 MPa e apresentaram o mesmo comportamento analisados por Velosa [5].

Tabela 5 – Resistência mecânica à Compressão e o Coeficiente de Capilaridade das argamassas

| | Resistência à Compressão (MPa) | | Coeficiente de capilaridade (g/cm$^2$) | |
|---|---|---|---|---|
| | 28 dias | 60 dias | 30 dias | 60 dias |
| Argamassa A | 1,24 | 1,62 | 0,63 | 0,64 |
| Argamassa C | 0,64 | 0,75 | 0,82 | 1,42 |
| Argamassa D | 0,75 | 0,96 | 1,10 | 1,35 |
| Argamassa E | 0,97 | 1,00 | 1,52 | 1,07 |

## 4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados das análises pode-se ter as seguintes conclusões:

As argamassas com maior percentual de metacaulim tiveram um endurecimento e desmolde mais rápidos, em virtude das reações pozolânicas ocorridas entre o hidróxido de cálcio e os compostos presentes na pozolana.

A argamassa A tão somente de cal, estudada como parâmetro, obteve uma maior resistência mecânica à compressão que as demais argamassas com pozolana, pois o maior teor de cal proporcionou uma maior capacidade de absorção a impacto.

Em relação à resistência mecânica à compressão com o coeficiente de capilaridade e o teor de metacaulim, constatou-se que: Aos 30 dias, a resistência à compressão é diretamente proporcional ao coeficiente de capilaridade e ao teor de metacaulim. As argamassas que tiveram maior valor na resistência mecânica (E>D>C), tiveram maiores valores no coeficiente de capilaridade (E>D>C) e possuíam os maiores teores de metacaulim. Desta forma, o aumento do coeficiente de capilaridade e as relações A/MS mais elevadas em decorrência do material pozolânico, não interferiram no ganho de resistência mecânica. Em relação à variação de massa até os 28 dias, as argamassas com metacaulim ganharam lentamente massa e ganharam resistência mecânica. Tal fato não ocorreu com a argamassa E, que manteve o comportamento de perda de água de amassamento, mesmo tendo a maior resistência mecânica à compressão das argamassas com metacaulim, atribuição das reações pozolânicas.

Entretanto, constatou-se que houve um ganho de resistência mecânica com o passar das idades, apesar do aumento do coeficiente de capilaridade nas argamassas com metacaulim, exceto na argamassa E, em virtude da elevada relação água/material seco. O ganho de resistência em detrimento ao aumento do coeficiente de capilaridade pode ser atribuído à interferência das reações pozolânicas ocorridas entre a cal e o metacaulim, e que apesar da elevação do coeficiente de capilaridade, pode ter havido um refinamento do tamanho dos

poros destas argamassas. Tal fator deve ser estudado com maior profundidade em futuros trabalhos.

A abordagem das características mecânicas das argamassas mistas com metacaulim mostrou que há a possibilidade da utilização destas argamassas em obras de restauro em revestimentos históricos.

## 5. REFERÊNCIAS

1. GRILO, J.; SILVA, A. Santos; FARIA, P.; GARNEIRO, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A.. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in diferent curing conditions. **Construction and Building Materials.** v. 51, 2014, p. 287-294.

2. SOUZA, Juliana Santa Cruz. **Estudo de argamassas à base de cal e metacaulim para intervenção em revestimento em edificações históricas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

3. GARNEIRO, A.; SILVA, A. Santos; VEIGA, R.; VELOSA, A.. Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. **Thermochimica Acta.** v. 535, 2012, p. 36-41.

4. JAPPIASSU, Pammila. **Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal em revestimentos históricos.** Dissertação de Mestrado em Geotécnica e Construção Civil – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

5. VELOSA, Ana L. P. L. **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.

6. VEIGA, M. R.; VELOSA, A.; MAGALHÃES, A.. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evoluation. **Constrution and Building Materials.** Vol. 23, january, 2009, p. 318-327.

7. MLEZA, Y. HAJJAJI, M.. Microstructural characterisation and physical properties of cured thermally activated clay-lime blends. **Construction and Building Materials**. Vol. 26, 2012, p.226-232.

8. VELOSA, Ana Luisa. Influence of pozzolanic additions to lime mortars for building conservation purposes. 3° Ed. LNEC, **Cadernos de Edifícios**, n° 2, 2011, p. 103-115.

9. ANDREJKOVIČOVÁ, S.; VELOSA, A. L.; FERRAZ, E.; ROCHA, F.. Influence of Clay mineral addition on mechanical properties of air lime-metakaolin mortars. **Construction and Building Materials.** Vol. 65, 2014, p. 132-139.

10. AGGELAPOULOU, Eleni; BAKOLAS, Asterios; MOROPOULOU, Antonia. Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic mansonries. Applied Clay Science. 2011, p. 15-19.

11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45 – Agregado: Determinação de massa unitária e volume de vazios**, Rio de Janeiro, 2006.

12. _____. **NBR NM 248 – Agregados: Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.

13. _____. **NBR 13276 – Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Preparação da mistura e determinação do índice de consistência padrão**, Rio de Janeiro, 2002.

14. _____. **NBR 13278 – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**, Rio de Janeiro, 1995.

15. _____. **NBR 7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**, Rio de Janeiro, 1996.

16. _____. **NBR 15259 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**, Rio de Janeiro, 2005.

17. VEIGA, M. Rosário. Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos. **In: Seminário de Sais Solúveis em argamassas de edifícios antigos.** Lisboa: LNEC, 2005.