

## XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção  
São Paulo, 21 a 23 de Setembro de 2016

# DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ARGAMASSAS DE CAL COM ADIÇÕES DE POZOLANAS<sup>1</sup>

**SILVOSO, Marcos Martinez (1), HAINFELLNER, Katharine Pontes (2), CHAVES, Caroline  
Batista (3), MARTINHO, Renata de Oliveira (4)**

(1) UFRJ, e-mail: silvoso@fau.ufrj.br; (2) UFRJ, e-mail: kakahainfellner@hotmail.com; (3)  
UFRJ, e-mail: carolineebatista@hotmail.com; (4) UFRJ, e-mail:  
re.martinho@hotmail.com

### RESUMO

No Brasil argamassas de cal foram predominantes até a chegada do cimento Portland no século XIX. Sua utilização em revestimentos muitas vezes incorporava pigmentos minerais que além de atribuir cor, possuíam características pozolânicas, conferindo maior resistência e durabilidade. Este trabalho busca analisar experimentalmente o comportamento de argamassas de cal com adições pozolânicas visando sua utilização em projetos de restauro. Foram produzidas argamassas de cal com adição de três pozolanas: pó de tijolo moído, metacaulim e cinza volante, com traços na proporção volumétrica 1:3:2, aglomerante, areia e água respectivamente. Os aglomerantes compostos por cal e pozolana foram avaliadas em diferentes proporções 1:0,5; 1:1; 1:2; 1:3 de cal e pozolana. Para avaliar o comportamento mecânico das argamassa foram realizados ensaios no estado endurecido, obtendo-se a resistência à compressão e as curvas tensão x deformação. Através dos ensaios de índice de consistência, realizados no estado fresco, constatou-se que com o aumento do teor de tijolo moído e metacaulim reduz a trabalhabilidade da argamassa, enquanto a cinza volante proporciona o aumento de sua fluidez. Os ensaios no estado endurecido permitiram identificar as proporções entre cal e pozolana que propiciaram aumento na resistência mecânica da argamassa e seu efeito na rigidez do material.

**Palavras-chave:** Argamassas. Cal. Pozolana. Restauro.

### ABSTRACT

*In Brazil lime mortars were predominant until the arrival of Portland cement in the nineteenth century. Its use as a coating mortar could incorporate mineral pigments that besides assigning color, had pozzolanic characteristics, giving them greater strength and durability. This paper presents the experimental analysis of behavior lime mortars with pozzolanic additions aiming its use in restoration projects. Lime mortars were produced with addition of three pozzolans: ceramic powder, fly ash, and metakaolin with a volumetric ratio of 1: 3: 2, binder, sand and water respectively. The binders of lime and pozzolan were evaluated at different ratios 1: 0.5; 1: 1; 1: 2; 1: 3, lime and pozzolan respectively. Tests on samples were performed in the hardened state to assess the mechanical behavior of mortars and get the resistance to compression and tension-deformation curves. Through the consistency index tests, carried out in the fresh state, it was found that with the increase of ceramic powder and metakaolin occurs a reduction in workability of mortar, while the fly ash provides increased fluidity. The mechanical tests identified the proportions of lime and pozzolan which caused*

---

<sup>1</sup> SILVOSO, Marcos Martinez; HAINFELLNER, Katharine Pontes; CHAVES, Caroline Batista; MARTINHO, Renata de Oliveira. Desenvolvimento e análise experimental de argamassas de cal com adições de pozolanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

*an increase in the mechanical resistance of the mortar and its effect on the rigidity of the material.*

**Keywords:** Mortar. Lime. Pozzolan. Restoration.

## 1 INTRODUÇÃO

Do período colonial até meados do século XX, as argamassas de cal para revestimento foram muito comuns no Brasil. Historicamente, os sistemas construtivos brasileiros se iniciaram com a utilização de sistemas de terra, tais como pau-a-pique, taipa de pilão e adobe. A colonização portuguesa trouxe para o país a argamassa que continha como aglomerante a cal, e em meados do século XVI começaram a surgir as construções à base de cal (COSTA, 2003). Tal presença ocorria notadamente nas regiões litorâneas em função da disponibilidade de conchas marinhas, matéria-prima utilizada na época no Brasil para a produção da cal (GOMES, 2006).

O uso da cal como principal aglomerante presente em revestimentos perdurou até a chegada do cimento Portland (final do século XIX). Em projetos de manutenção e restauro de edifícios antigos deve-se respeitar o comportamento dos materiais e compreendê-los a luz das técnicas construtivas utilizadas durante o período de sua construção. Dessa forma, quando se pretende intervir em edifícios com revestimentos originalmente compostos com argamassas de cal, deve-se evitar a utilização do cimento Portland. O cimento Portland quando utilizado em argamassas de revestimento em edifícios históricos impermeabiliza suas alvenarias, prejudicando seu comportamento físico e mecânico.

Pelo valor histórico e artístico dos revestimentos, a teoria arquitetônica e científica da restauração estabelece a manutenção, sempre que possível, das superfícies arquitetônicas e seus revestimentos, utilizando-se de procedimentos de reparação e consolidação como a primeira alternativa em intervenções de restauro em edifícios antigos (VEIGA, 2004). Porém, devido ao estado de deterioração, às vezes é necessário proceder à renovação total ou parcial destes revestimentos. De acordo com Fonseca (2006), ocorre uma aceleração da degradação do revestimento e, conseqüentemente, da alvenaria, em função da incompatibilidade da pintura nova com o material antigo que compõe as paredes da edificação, pois os materiais atuais tendem a impermeabilizar as alvenarias, enquanto os revestimentos de fachadas a base de cal são permeáveis.

Ao produzir argamassas de substituição é necessário levar em consideração que não se deve inserir nenhum material que seja mais resistente que o existente, sendo esta a razão pela qual aplicações de cimento Portland em revestimentos à base de cal não são adequadas, pois se os esforços atuarem sobre a estrutura mais antiga, haverá a perda de um testemunho histórico (GLEIZE et al., 2009). Além disso, é importante ressaltar que, ao aplicar procedimentos de coloração nestes revestimentos históricos, as técnicas de pigmentação antigas também devem ser respeitadas. Tintas plásticas (acrílica, PVA) funcionam de forma inadequada sobre paredes de

edifícios antigos, pois criam películas impermeáveis que não são compatíveis à porosidade das paredes antigas (VELOSA, 2009). Visando o desenvolvimento de adequados projetos de restauro de revestimento argamassado de edifícios de interesse históricos, é crescente o interesse no desenvolvimento de pesquisas sobre as argamassas de cal e adições minerais que confiram pigmentação às argamassas.

A cal é um aglomerante inorgânico, ou mineral, aéreo, que misturado com água, forma uma pasta com propriedades aglomerantes, cujo endurecimento se dá pela reação com o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), e após este processo, não resiste em ambientes úmidos ou em contato permanente com água. A utilização de pozolanas em conjunto com a cal possibilita a produção de um aglomerante hidráulico, resultando em produtos que resistem satisfatoriamente a ação da água. A cal é um dos ligantes mais antigos que se tem conhecimento, seu uso foi frequente entre as antigas civilizações como material construtivo, porém ao longo do tempo variou-se o processo de obtenção deste material, com a utilização de diferentes matérias-primas, tais como calcários, corais, mármore, e conchas de diversas espécies (SANTIAGO, 2007).

As construções com revestimento de argamassas à base de cal podiam ser encontradas na cor natural da cal (branca) ou em tons obtidos a partir da incorporação de pigmentos minerais como terras de óxido de ferro, cinzas e lazurita, materiais que apresentam características pozolânicas. De acordo com Velosa (2009, apud Cruz Souza, 2013, p. 19) argamassas com este tipo de adição apresentam características satisfatórias no seu comportamento e nas suas propriedades, conferindo durabilidade e resistência à ação prolongada da água. As pozolanas podem ser definidas com materiais silicosos ou sílico-aluminosos que possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que quando finamente moídos e na presença de água reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio. Sua denominação deriva de uma região italiana conhecida por *Pozzoulli*, onde são encontradas cinzas vulcânicas, já utilizadas no império romano para, em conjunto com a cal, produzir argamassas e concretos resistentes à ação da água.

Neste contexto o presente trabalho busca analisar experimentalmente o comportamento de argamassas de cal com adição de diferentes pozolanas visando sua utilização em projetos de restauro de edificações antigas. No programa experimental desenvolvido foram avaliadas diferentes composições de argamassas de cal com três pozolanas, o pó de tijolo moído, a cinza volante e o metacaulim.

Diferentes fontes (KANAN, 2008 e VELOSA, 2009) sugerem a utilização de resíduo cerâmico como uma adição mineral empregada em argamassas de cal. O pó de cerâmica traz benefícios porque favorece o aumento da porosidade na argamassa, ajuda na pega e na cura final, e, dessa forma, melhora a durabilidade da argamassa. Também apresenta pozolanicidade, podendo ser utilizada inclusive para a produção de concretos em substituição parcial do Cimento Portland (GONÇALVES, 2005). Além disso,

garante uma pigmentação mais intensa por fazer parte da composição da argamassa e não ser apenas uma camada externa de pintura. A cinza volante utilizada é um subproduto resultante da combustão de carvão mineral pulverizado para a geração de energia. Ela é coletada nos precipitadores eletrostáticos e normalmente forma um aglomerado que é separado por moagem. Segundo Hoppe Filho (2008), a interação da cinza volante com a cal e a água resulta na formação de compostos hidratados, e a cinza volante consome esse hidróxido de cálcio, por atividade pozolânica. A terceira pozolana analisada é uma metacaulinita comercial, produzida a partir da calcinação do mineral caolinita, que se origina da alteração dos aluminossilicatos, principalmente feldspatos e micas. Trata-se de um material pulverulento, que apresenta características pozolânicas, podendo ser utilizado como material suplementar em argamassas e concretos (GONÇALVES, 2005).

## **2 MATERIAIS**

### **2.1 Cal**

No programa experimental realizado, foi utilizada cal hidratada do tipo CH1, com massa específica 2,43 kg/dm<sup>3</sup>.

### **2.2 Areia**

Foi utilizado areia lavada e peneirada, separada nas seguintes frações granulométricas, grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100), reproduzindo a classificação utilizada na areia normal brasileira do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Tal procedimento teve o objetivo de garantir a mesma distribuição granulométrica para todos os ensaios realizados. A massa específica, obtida experimentalmente foi de 2,60 g/cm<sup>3</sup>.

### **2.3 Metacaulim**

A adição mineral de metacaulim possui em sua composição química predominante o Silicato de alumínio ( $Al_2Si_2O_7$ ), coloração creme claro, e suas principais características físico - químicas são: massa específica de 2,56 kg/dm<sup>3</sup>, área específica BET: 230.000cm<sup>2</sup>/g, atividade pozolânica Chappelle: 880mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g, perda ao fogo de 3%.

### **2.4 Cinza volante**

A cinza volante utilizada foi produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas. De acordo com o fabricante sua composição química é SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, possui coloração cinza claro e suas principais características físico-químicas são: massa específica: 2,35 kg/dm<sup>3</sup>, índice de atividade pozolânica com o cal aos 7 dias > 6,0 MPa e perda ao fogo < 2,0%.

## 2.5 Tijolo moído

O pó de tijolo moído foi o material cerâmico analisado, produzido pela moagem de resíduos de blocos cerâmicos em laboratório e possui tom avermelhado. Foi utilizado um moinho de bolas/barras do tipo SONNEX marca PAVITEST. A moagem com barras de aço realizou a redução dos fragmentos de blocos cerâmicos, obtidos comercialmente na cidade do Rio de Janeiro, para uma granulometria próxima a areia. Após essa etapa, o resíduo foi submetido a um novo processo de moagem, desta vez, com a utilização de esferas de aço por 4 horas, de modo a obter um pó. Em ambas etapas foram utilizados 7 kg de resíduo para aproximadamente 60 kg de corpos moedores. A Figura 1 ilustra o moinho e o resíduo cerâmico antes e após o término da moagem.

Figura 1 - Moinho, fragmentos do resíduo cerâmico e seu aspecto após a moagem



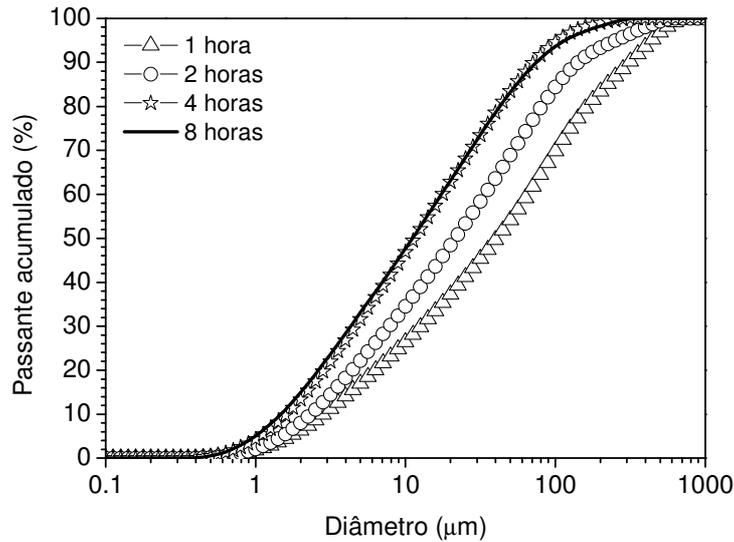
Fonte: Autores

A massa específica foi determinada conforme a ABNT NBR NM 23:2000 obtendo-se  $2,58 \text{ kg/dm}^3$ . Os resultados da análise granulométrica estão apresentados na Com relação a atividade pozolânica, ensaios realizados utilizando cimento Protland, conforme estabelecido pela 12653:2012, indicaram uma relação de 67% entre o valor de resistência à compressão obtido para a argamassa de referência (REF) e para a argamassa contendo o resíduo cerâmico (REF\_RT). Tal valor é um indicativo de não pozolanicidade do resíduo cerâmico analisado.

Figura 2 (granulometria laser), para amostras coletadas em diferentes intervalos de tempo de moagem (1h, 2h, 4h e 8h). Observa-se que para 4 horas de moagem 50% dos grãos do resíduo são inferiores a  $11 \mu\text{m}$ .

Com relação a atividade pozolânica, ensaios realizados utilizando cimento Protland, conforme estabelecido pela 12653:2012, indicaram uma relação de 67% entre o valor de resistência à compressão obtido para a argamassa de referência (REF) e para a argamassa contendo o resíduo cerâmico (REF\_RT). Tal valor é um indicativo de não pozolanicidade do resíduo cerâmico analisado.

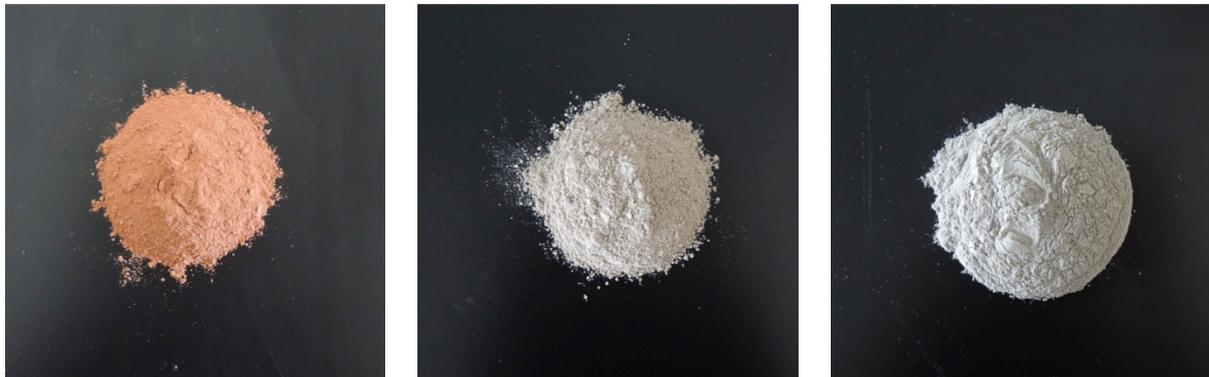
Figura 2 - Curvas granulométricas do resíduo cerâmico



Fonte: Autores

A Figura 3 ilustra os aspectos das adições minerais empregadas em conjunto com a cal para a produção das argamassas analisadas.

Figura 3 - Aspecto das adições minerais analisadas: pó de tijolo moído, metacaulim e cinza volante, respectivamente.



Fonte: Autores

### 3 MÉTODOS

#### 3.1 Produção de misturas

##### 3.1.1 Definição dos traços

Os traços analisados foram estabelecidos com base na bibliografia e a partir dos resultados de Índice de Consistência (NBR 5751 ABNT 2012). A relação volumétrica aglomerante:areia foi adotada como 1:3, por se tratar de um traço usual em obras de restauro para argamassas a base de cal. Souza

(2013) indica que historicamente as argamassas a base de cal para revestimentos utilizavam relações cal:areia de 1:1, 1:2, 1:3 e 1:4. No programa experimental realizado, fixou-se a relação aglomerante:areia (1:3), de modo a possibilitar a análise do efeito das pozolanas estudadas em conjunto com a cal. A proporção de água (relação volumétrica aglomerante:água) foi definida através de estudos preliminares com argamassas de cal e tijolo moído de modo que estas atingissem um índice de consistência de  $225 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$ , tendo sido encontrada uma relação aglomerante:água de 1:2. Assim os traços foram definidos utilizando uma proporção volumétrica 1:3:2 fixa, sendo: o número 1 referente ao aglomerante (cal e adição mineral), o número 3 referente à areia e o número 2 à água. Mantendo fixas as proporções de areia e água com relação ao aglomerante, foram analisadas diferentes misturas considerando as seguintes relações volumétricas cal:pozolana: 1:0,5 ; 1:1 ; 1:2 ; 1:3. A partir dos resultados do ensaio de Índice de Consistência foram avaliados ainda traços variando a proporção aglomerante:água, determinados de modo a manter constante o índice de consistência ( $225 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$ ). A Tabela 1 apresenta a nomenclatura utilizada.

Tabela 1 – Argamassas analisadas (nomenclatura e relações volumétricas).

<b>Pozolana</b>	<b>Cal:Pozolana</b>	<b>Aglomerante:água 1:2</b>	<b>Aglomerante:água variável*</b>
Metacaulim	1:0,5	Mk305	Mk305x
	1:1	Mk310	Mk310x
	1:2	Mk320	Mk320x
	1:3	Mk330	Mk330x
Cinza Volante	1:0,5	Cv305	Cv305x
	1:1	Cv310	Cv310x
	1:2	Cv320	Cv320x
	1:3	Cv330	Cv330x
Tijolo moído	1:0,5	Tj305	-
	1:1	Tj310	-
	1:2	Tj320	-
	1:3	Tj330	Tj330x

\* A relação aglomerante:água é variável, mantendo constante o I.C. Fonte: Autores

### 3.1.2 Produção das argamassas

As argamassas foram produzidas em laboratório climatizado, com temperatura mantida a  $24 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Os materiais foram pesados em balança eletrônica e a mistura foi realizada em argamassadeira padrão. O procedimento adotado é sucintamente descrito a seguir: homogeneização dos aglomerantes (mistura Cal e pozolana); homogeneização manual dos aglomerantes com a areia; adicionar a água e misturar por 1 minuto na velocidade 1; manter em descanso por 2 minutos; mistura por mais 1 minuto na velocidade 2; descansar por 1 minuto, antes da realização do ensaio de

Índice de Consistência.

Após a realização dos ensaios no estado fresco, para cada argamassa foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 x 10 cm, para determinação da resistência à compressão. As dimensões dos corpos de prova foram adotadas conforme prescrito pela NBR 5751 (ABNT 2012). A mistura e a moldagem foram realizadas conforme a NBR 7215 (ABNT 1996). As argamassas de tijolo moído e metacaulim permaneceram nos próprios moldes por 4 dias até a desmoldagem. As argamassas que utilizaram cinza volante apresentaram um maior tempo de pega, tendo sido necessário aguardar de 5 à 14 dias para a retirada do molde. Após a desmoldagem os corpos de prova foram mantidos ao ar em laboratório, durante 100 dias antes da realização dos ensaios de resistência à compressão.

### **3.2 Ensaio no estado fresco**

#### **3.2.1 Índice de consistência**

Para avaliação da trabalhabilidade das argamassas foi realizado o ensaio de Índice de Consistência conforme preconizado pela NBR 7215 (ABNT 1996). Para as argamassas que não atingiram o espalhamento de  $225 \text{ mm} \pm 25 \text{ mm}$ , utilizado como critério para estabelecer um padrão de trabalhabilidade, o ensaio foi repetido corrigindo a quantidade de água até ser atingido o I.C. esperado.

### **3.3 Ensaio no estado endurecido**

#### **3.3.1 Ensaio de resistência à compressão**

Para cada argamassa o ensaio de resistência à compressão foi realizado em 3 corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm), com idade aproximada de 100 dias. Os ensaios foram feitos em prensa universal hidráulica, AMSLER (modernizada em 2013), com capacidade de carga de 30Tf. O software CSHC 40 da prensa foi configurado com uma velocidade de carregamento de 1,00 kgf/s. Através de sensores de deslocamento (LVDT), ligados a um sistema de aquisição de sinais Lynx, foi possível determinar durante a realização do ensaio, as curvas tensão x deformação das diferentes argamassas analisadas. A Figura 4 ilustra o ensaio de resistência à compressão.

Figura 4 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autores

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Estado fresco

A Tabela 3 apresenta os resultados de Índice de Consistência obtidos no estado fresco para as argamassas estudadas, onde a nomenclatura empregada corresponde a apresentada na Tabela 1. Também é apresentada a relação aglomerante:água para as diferentes argamassas.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios no estado fresco

Pozolana	Argamassa	Aglomerante : água	IC (mm)
Metacaulim	Mk305	1 : 2,0	180
	Mk305x	1 : 2,2	225
	Mk310	1 : 2,0	170
	Mk310x	1 : 2,3	230
	Mk320	1 : 2,0	150
	Mk320x	1 : 2,4	215
	Mk330	1 : 2,0	145
	Mk330x	1 : 2,5	220
Cinza Volante	Cv305	1 : 2,0	280
	Cv305x	1 : 1,5	210
	Cv310	1 : 2,0	300
	Cv310x	1 : 1,4	200
	Cv320	1 : 2,0	310
	Cv320x	1 : 1,5	225
	Cv330	1 : 2,0	310
	Cv330x	1 : 1,6	250
Tijolo moído	Tj305	1 : 2,0	225
	Tj310	1 : 2,0	215
	Tj320	1 : 2,0	215
	Tj330	1 : 2,0	180
	Tj330x	1 : 2,1	230

Fonte: Autores

Observando os dados da Tabela 3, conclui-se que para argamassas com tijolo moído a relação água:aglomerante 1:2 conduz a Índices de Consistência dentro da faixa adotada. Exceção feita para a argamassa TJ330, onde foi necessário a adição de água para manutenção da trabalhabilidade (Tj330x).

Argamassas com adição de cinza volante apresentaram um aumento do Índice de Consistência com o teor de adição em relação a cal, tendo sido verificado um aumento da fluidez da argamassa. Dessa forma, foi necessário a correção do traço com a diminuição do teor de água para obtenção de uma argamassa com a trabalhabilidade requerida.

Nas argamassas com adição de metacaulim, todos os traços apresentaram uma redução do Índice de Consistência com o aumento do teor de metacaulim, produzindo argamassas mais secas. Para obtenção de argamassas com a trabalhabilidade requerida os traços foram corrigidos com adição de água.

#### **4.1 Estado endurecido**

A Tabela 4 apresenta os resultados de resistência à compressão obtidos no estado endurecido para as argamassas estudadas. Também são apresentados o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

<b>Argamassas</b>	<b>*f<sub>c</sub> (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
Mk305	2,35	0,17	7,32%
Mk305x	2,11	0,07	3,13%
Mk310	3,06	0,24	7,76%
Mk310x	2,30	0,08	3,30%
Mk320	6,37	0,95	14,95%
Mk320x	3,31	0,19	5,78%
Mk330	3,82	0,60	15,63%
Mk330x	2,69	0,12	4,32%
Cv305	0,72	0,06	8,39%
Cv305x	0,90	0,05	5,47%
Cv310	0,63	0,05	8,66%
Cv310x	1,32	0,04	4,34%
Cv320	0,45	0,05	11,05%
Cv320x	0,82	-	-
Cv330	0,68	0,01	1,47%
Cv330x	0,61	0,07	11,97%
Tj305	1,89	-	-
Tj310	1,45	0,13	9,30%
Tj320	0,90	0,04	4,48%
Tj330	0,43	0,05	11,43%
Tj330x	0,53	0,03	6,54%

\*Valor médio resultante dos resultados de três corpos de prova, exceção feita as misturas Cv320x e Tj305, onde foram utilizados os resultados de apenas dois corpos de prova. Fonte: Autores

A análise dos resultados de resistência à compressão indicam que as argamassas com metacaulim foram aquelas que apresentaram a maior resistência em todos os teores avaliados. Observa-se ainda, que a proporção cal:metacaulim de 1:2 foi conduzida aos maiores valores de resistência à compressão (mistura Mk320). Com relação às misturas onde foi modificado o teor de água para manutenção do Índice de Consistência (misturas com sufixo x), percebe-se que o aumento da quantidade de água levou a uma queda da resistência, mas ainda assim, a proporção cal:metacaulim de 1:2 foi aquela onde foi obtida a maior resistência.

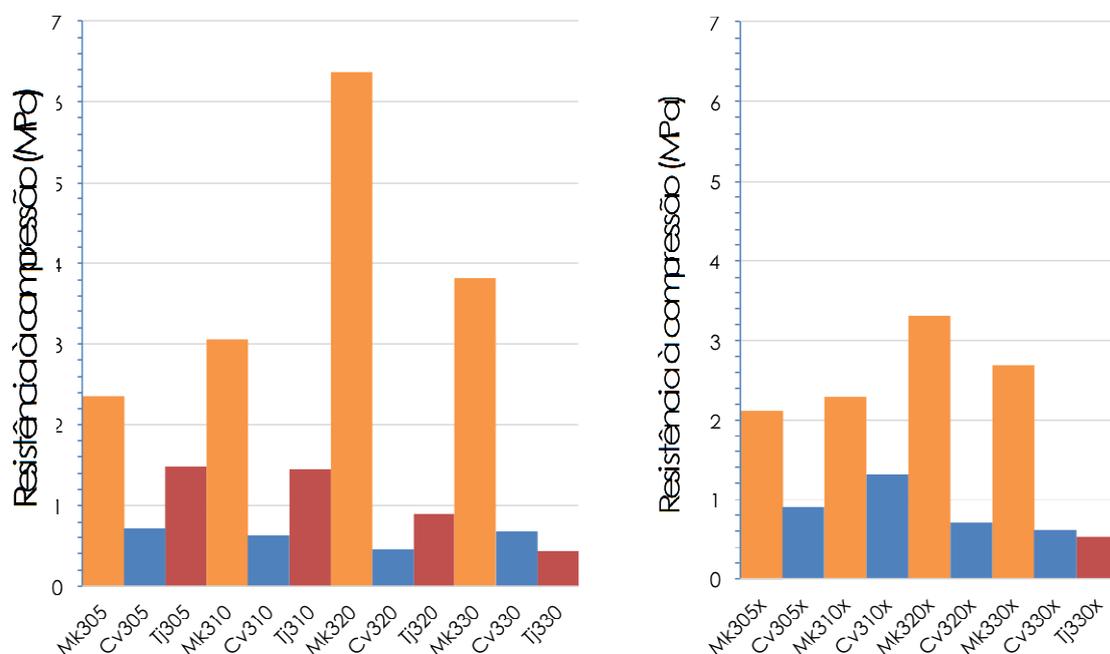
As argamassas com utilização de cinza volante apresentaram as menores resistências. Apenas na proporção cal:cinza volante de 1:3 (Cv330) o valor médio de resistência à compressão foi superior ao obtido na argamassa com

tijolo moído com o mesmo teor adição mineral (Tj330). Observa-se, como esperado, que a redução do teor de água (misturas com sufixo x) propiciou um aumento nas resistências das argamassas. O maior valor médio de resistência à compressão para essa série de misturas foi obtido quando adotada uma relação cal:cinza volante de 1:1, e uma relação aglomerante:água de 1:1,4 (mistura Cv310x).

As argamassas com tijolo moído apresentaram valores intermediários de resistência à compressão, sendo que o aumento do teor do tijolo moído proporcionou uma queda na resistência. Para essa série, observa-se que o maior valor de resistência à compressão foi obtido para relação cal:tijolo moído de 1:0,5 e relação aglomerante:água de 1:2.

A Figura 5 apresenta de modo comparativo os resultados dos valores médios obtidos para a resistência à compressão de todas as argamassas analisadas.

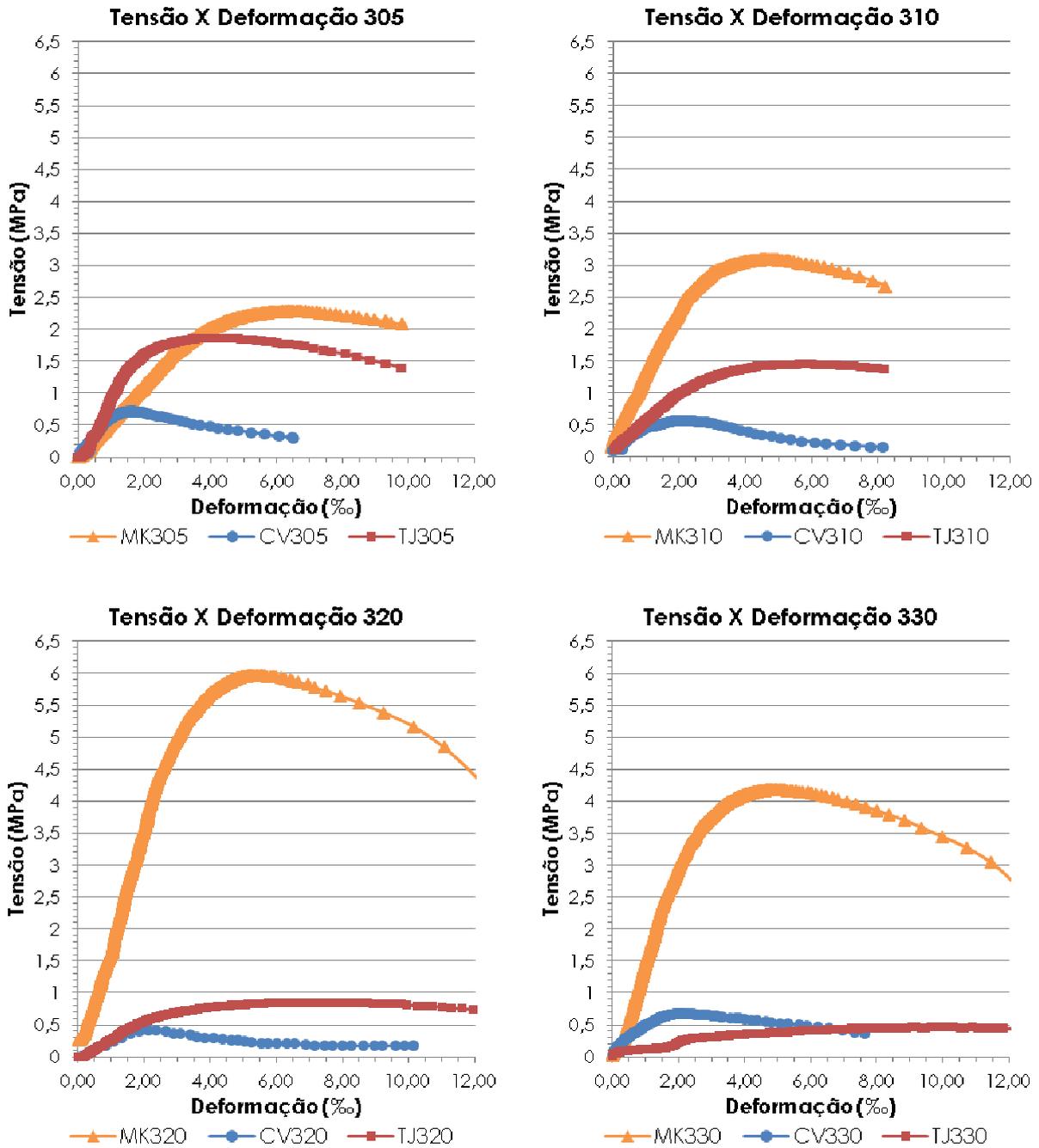
Figura 5 - Valores médios de resistência à compressão dos traços sem e com alteração no teor de água, respectivamente.



Fonte: Autores

Durante os ensaios de resistência à compressão foram obtidas as curvas tensão x deformação para todas as argamassas estudadas. A Figura 6 apresenta curvas típicas para as argamassas com a mesma proporção aglomerante:água (1:2). De modo geral, observa-se que as argamassas com metacaulim, além de apresentarem maiores valores de resistência à compressão, também apresentaram uma maior rigidez do trecho linear-elástico, excetuando-se as argamassas com relação cal:pozolana de 1:0,5, onde a maior rigidez foi observada para a argamassa com tijolo moído. Observa-se ainda, que as argamassas com tijolo moído apresentam uma maior deformabilidade, com maiores deformações de ruptura para as proporções cal:pozolana 1:1, 1:2 e 1:3.

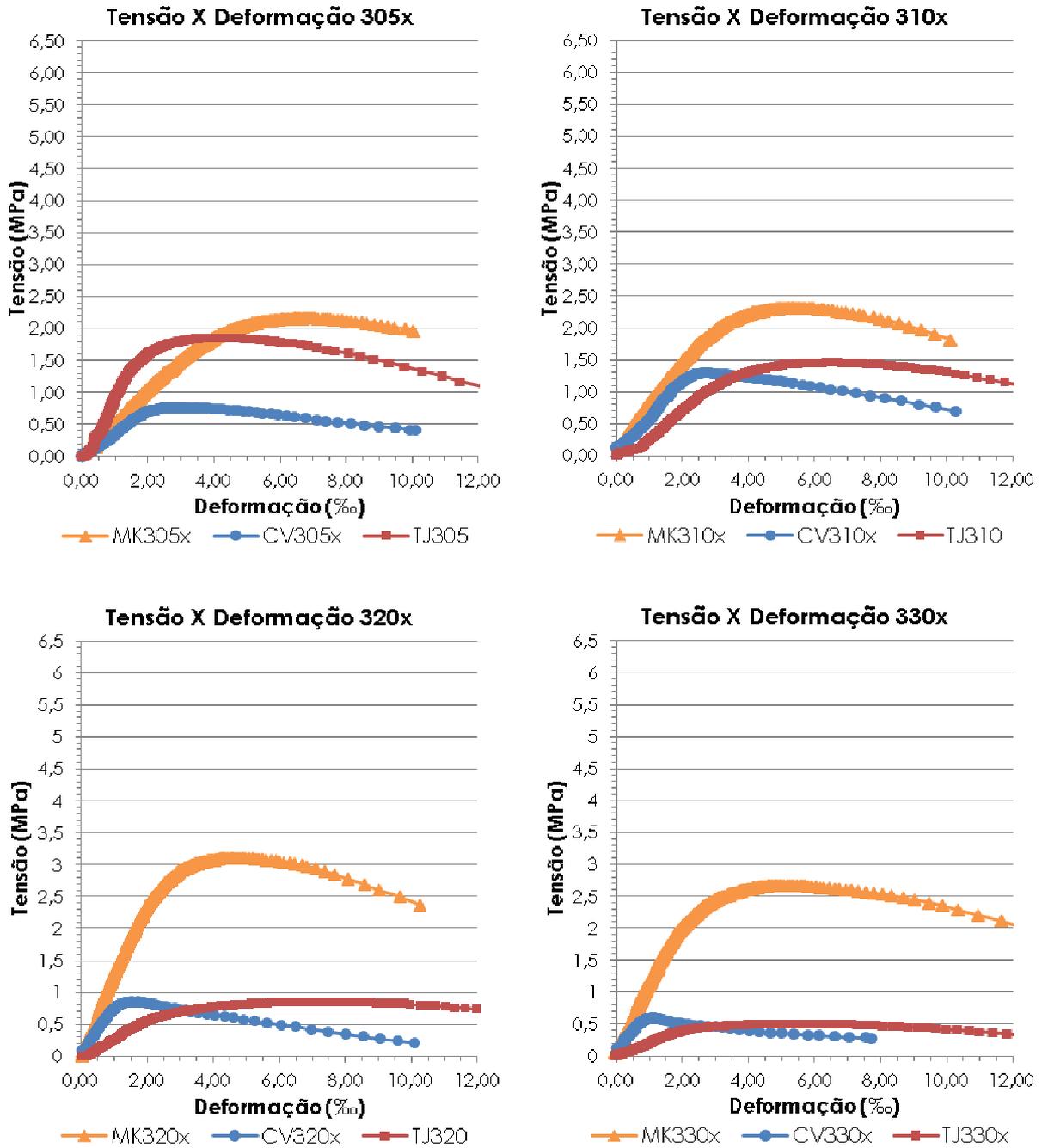
Figura 6 - Curvas típicas de tensão x deformação para as argamassas com a mesma relação aglomerante:água (1:2)



Fonte: Autores

A Figura 7 apresenta curvas típicas de tensão x deformação para argamassas com I.C dentro da faixa estipulada, mas com variação da relação aglomerante:água. Tal análise tem por objetivo permitir a comparação do comportamento das argamassas com trabalhabilidade equivalente.

Figura 7 - Curvas típicas de tensão x deformação para as argamassas com o mesmo Índice de Consistência e variação da relação aglomerante:água



Fonte: Autores

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho permitiram avaliar o comportamento de argamassas de cal com a utilização de diferentes pozolanas em diferentes teores.

No estado fresco constatou-se que com o aumento do teor de tijolo moído e metacaulim verifica-se uma diminuição do índice de consistência, enquanto a cinza volante proporciona uma maior fluidez da argamassa.

No estado endurecido observa-se que argamassas com metacaulim apresentaram maiores resistências à compressão, sendo que a proporção cal:metacaulim de 1:2 foi aquela que proporcionou as resistências máximas, mesmo na mistura onde foi alterado o teor de água para manutenção da trabalhabilidade.

As argamassas com cinza volante apresentaram as menores resistências à compressão, indicando uma menor reatividade do material com cal, fato também verificado pelo endurecimento mais lento observado quando da desmoldagem dos corpos de prova. A argamassa com proporção cal:cinza volante de 1:1 foi a que apresentou maior resistência à compressão.

Nas argamassas com tijolo moído, para as proporções analisadas, o aumento do teor de adição mineral levou a uma redução da resistência à compressão. O maior valor de resistência à compressão foi obtido para a proporção cal:tijolo moído de 1:0,5. Observa-se, no entanto, que quando foi utilizada a mistura cal:tijolo moído de 1:1, obteve-se um valor de resistência à compressão ainda satisfatório, porém com maior deformação de ruptura, o que é benéfico para em argamassas de revestimento.

Os teores de água foram alterados na produção das argamassas para elas manterem a mesma trabalhabilidade. Foi possível constatar que o aumento deste teor de água resultou na redução nos valores de resistência à compressão nas argamassas com metacaulim. Nas argamassas com cinza volante, a diminuição de água aumentou a resistência à compressão da argamassa.

Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre o comportamento de argamassas de cal com adições das pozolanas estudadas. Os resultados preliminares apresentados neste trabalho indicam que os materiais desenvolvidos apresentam potencial de aplicação como argamassas de revestimento em projetos de restauro de edifícios antigos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751** - Materiais Pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. Revisão em 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR12653:** Cimento Portland - Materiais Pozolânicos, Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR15894:** Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Rio de Janeiro, 2010

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23:2000:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica . Rio de Janeiro, 2000.

COSTA, A. P. T. **Argamassas de revestimento para fachadas em edificações históricas: composição, aplicabilidade e restauro.** 2003. 127 mestrado - PROARQ-FAU/UFRJ, 2003.

FONSECA, D. B. **Tintas e pigmentos no patrimônio urbano pelotense: um estudo dos materiais de pintura do século XIX.** Mestrado, UFBA, 2006. 205p.

GLEIZE, P.J.P.; MOTTA, E.V.; SILVA, D.A.; ROMAN, H.R. **Characterization of historical mortars from Santa Catarina (Brazil).** UFSC, 2009.

GOMES, A. O. **Argamassas para revestimento de edificações.** [S.l.]: UFBA, 2006.

GONÇALVES, J. P., **Desenvolvimento e Caracterização de Concretos de Baixo Impacto Ambiental Contendo Argila Calcinada e Areia Artificial.** Tese de Doutorado, UFRJ, 2005.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese de Doutorado, EPUSP, 2008. 247p.

KANAN, M. I. **Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal.** – Brasília, DF : IPHAN/Programa Monumenta, 2008. 172 p. (Cadernos Técnicos; 8).

SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal.** - Salvador : EDUFBA, 2007. 202 p

SOUZA, J. S. C. **Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas.** Mestrado - Recife, 2013. 227 p.

VEIGA, M. R.; AGUIAR, J.; SILVA, A. S.; CARVALHO, F. **Conservação e Renovação de Revestimentos de Paredes de Edifícios Antigos.** Lisboa: LNEC, 2004.126p.

VELOSA, A. L. P. L. **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas.** Aveiro: Doutorado em Engenharia Civil - Universidade de Aveiro, 2006.