

Utilização dos produtos da combustão do carvão mineral como aditivos na produção de argamassa para revestimento

Use of mineral coal combustion products as additives in the production of mortar for coating

DOI:10.34117/bjdv8n1-303

Recebimento dos originais: 07/12/2021

Aceitação para publicação: 17/01/2022

Joelane Maria de Carvalho Teixeira

Doutora - Instituto Federal do Piauí (IFPI)
Av Pedro Marques de Medeiros, s/n - Parque Industrial – Picos-PI
E-mail: PIjoelane.teixeira@ifpi.edu.br

Francisco Pimentel de Araújo Filho

Graduado
Rua das Olimpíadas, 451 - Parque Dois Irmãos - Fortaleza-CE
E-mail: pimentelaraújofilho@hotmail.com

Suely Alves Silva

Doutora - Centro Universitário UniFanor
Av. Bezerra de Menezes, 1277 - Fortaleza - CE
E-mail: profasuelysilva@gmail.com

Halisson de Souza Pinheiro

Doutorado - Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Av. da Abolição, 3 - Centro - Redenção
E-mail: halisson@unilab.edu.br

Ricardo Emílio Ferreira Quevedo Nogueira

DPhil in Materials Technology (Brunel University, UK)
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Campus Universitário do Pici, Bloco 729 - Pici - Fortaleza-CE
E-mail: emilio@ufc.br

RESUMO

A utilização de resíduos como materiais alternativos tem se mostrado uma solução satisfatória de acordo com várias pesquisas realizadas. O conjunto de cinzas leves, pesadas e escórias são denominados produtos da combustão do carvão mineral (PCC's). Esses resíduos causam impacto ambiental, mas apresentam grande potencial de utilização no setor da construção civil na produção de argamassas e concretos. Apresentam elevado teor de sílica (SiO_2), podendo ser utilizados como pozolanas. Esta pesquisa objetivou verificar a viabilidade da utilização dos produtos da combustão do carvão mineral em argamassas de assentamento e revestimento. As matérias-primas foram caracterizadas quanto aos aspectos físicos, químicos e para os PCC's também foi avaliada sua pozolanicidade. Foram confeccionadas argamassas de referência e com adição de PCC's nos teores de 10, 20, 30, 40 e 50% como substituto parcial do cimento. Após tempos de cura de 7 e 28 dias, foram feitos teste de resistência à tração na flexão e resistência

à compressão. Além disso, as argamassas foram sujeitas a análises de Fluorescência de Raios – X, Microscopia Eletrônica de Varredura, absorção de água, determinação de índice de vazios e massa específica aparente. Os resultados obtidos mostraram-se compatíveis quando comparados com os dados da literatura, demonstrando ser viável a aplicação dos produtos da combustão do carvão mineral na indústria da construção civil.

Palavras-chave: PCC's, Argamassa, Cerâmicas.

ABSTRACT

The use of waste as alternative materials has been shown to be a satisfactory solution according to several studies carried out. The set of light, heavy ashes and slag are called products of combustion of mineral coal (PCC's). These residues cause environmental impact, but have great potential for use in the civil construction sector in the production of mortars and concrete. They have a high silica content (SiO₂) and can be used as pozzolans. This research aimed to verify the feasibility of using the products of combustion of mineral coal in mortars for laying and coating. The raw materials were characterized in terms of physical, chemical aspects and for the CCP's their pozzolanicity was also evaluated. Reference mortars were made with the addition of CCP's in the contents of 10, 20, 30, 40 and 50% as a partial substitute for cement. After curing times of 7 and 28 days, flexural strength and compressive strength tests were performed. In addition, the mortars were subjected to X-ray fluorescence analysis, Scanning Electron Microscopy, water absorption, determination of voids index and apparent specific mass. The results obtained were compatible when compared with the data in the literature, demonstrating that the application of the products of the combustion of mineral coal in the construction industry is viable.

Keywords: CCP's, Marter, Ceramics.

1 INTRODUÇÃO

O uso de resíduos na construção civil tem sido um dos temas mais trabalhados e debatidos por pesquisadores nos últimos tempos. Com a possibilidade de se conquistar uma melhor colocação para a indústria de construção a partir da adoção e do emprego destes resíduos em materiais para vedação (blocos, tijolos e argamassas), pesquisadores vêm buscando conscientizar ceramistas, construtores e o próprio mercado consumidor quanto à importância da qualidade deste produto para as habitações (PRUDENCIO JUNIOR *et al.*, 2003).

Um dos resíduos sólidos mais significativos, em termos de volume, são as cinzas de carvão geradas em usinas termoelétricas. A queima do carvão mineral em caldeiras, além de gerar vapor, também produz resíduos durante o processo, ou seja, produtos da combustão do carvão mineral (PCC's). Esses produtos incluem as cinzas volantes (leves), as cinzas de fundo (pesada), as escórias, além de resíduo do FGD (sistema de dessulfurização de gases de combustão).

A indústria da construção civil é normalmente o maior usuário dos subprodutos do carvão mineral. Eles estão sendo cada vez mais usados como material aditivo ao concreto para

obter melhores propriedades de produtos frescos e endurecidos. O uso de cinzas volantes modifica a composição da pasta de cimento, influencia a hidratação e a microestrutura de argamassas e pastas, a permeabilidade e a resistência do concreto (POON, 1997).

A utilização do produto da combustão do carvão mineral na formulação de argamassas e concretos é uma alternativa interessante, visto que este material possui atividade pozolânica. Pozolanas são materiais silicosos ou silico aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes (NBR -12653, 1992).

As pozolanas frequentemente são mais baratas do que o cimento Portland que elas substituem. Apresentam, ainda, a característica de uma hidratação lenta, e uma baixa taxa de desenvolvimento de calor. Isto é de grande importância na construção em massa e é por isso que o cimento Portland-pozolana ou uma substituição parcial do cimento Portland pela pozolana são bastante utilizados (COIMBRA et al., 2002).

Por suas características físico-químicas, o uso desses subprodutos da queima de carvão mineral é associado a produtos que contem hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$. Estes são, geralmente, a cal hidratada e/ou cimento Portland, que misturados com as cinzas de carvão e em presença de água reagem quimicamente, combinando o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ dos aglomerantes com óxido de silício $[SiO_2]$ na fase vítrea das cinzas e, no caso de associação com o cimento Portland, resultando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) que melhora as características de desempenho do compósito (MARGON, 2002).

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade da utilização dos produtos da combustão do carvão mineral (PCC's) como substituto parcial do cimento Portland em argamassas de revestimento.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Produtos da combustão do carvão mineral

Os produtos da combustão do carvão mineral Fig. 1 utilizados nesta pesquisa são provenientes dos Estados Unidos da América (EUA), cedidos pela MPX Energia, empresa de energia do grupo EBX.

Figura 1 – Produtos da combustão do carvão mineral a) In natura e b) Seca e peneirada



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

2.1.2 Cimento

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o cimento Portland CP II F, classe 32, da marca Votorantim. Este foi utilizado por não conter pozolana em sua composição, pois os PCC's serão utilizados com esta função.

2.1.3 Cal

A cal utilizada foi a cal hidratada CH I, fornecida pela indústria Carbomil localizada na cidade de Fortaleza-CE. A cal foi retirada da embalagem comercial e acondicionada em sacos plásticos devidamente lacrados de forma a não modificar as propriedades originais e proteger das intempéries.

2.1.4 Areia

A areia utilizada foi proveniente de um depósito de materiais de construção da cidade de Fortaleza-CE.

2.1.5 Água

Foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal do Ceará (UFC).

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os materiais utilizados foram secos em estufa à 105 ± 5 °C por 24h e foram submetidos a vários processos de caracterização, descritos a seguir.

2.2.1 Determinação da massa específica

Para a determinação da massa específica dos materiais, utilizou-se a norma NM 23 (ABNT, 2001) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Utilizou-se o frasco Le Chatelier, que foi preenchido com xilol até uma marcação conhecida entre 0 e 1cm³. Após o colo do frasco volumétrico ter sido secado na parte acima do nível do líquido com papel absorvente, o frasco foi submerso em banho termorregulador até obter o equilíbrio térmico, e a leitura inicial (Vi) foi anotada. Em seguida, a amostra foi introduzida no frasco através de um funil de haste longa. Foram necessários 60g de cada material. Após promover a retirada de bolhas de ar, o frasco foi submerso no banho termorregulador até que fosse atingido o equilíbrio. Por fim, foi anotado a leitura final (Vf).

As massas específicas foram então calculadas de acordo com Eq. (1)

$$\rho = \frac{M}{V_f - V_i} \quad (1)$$

Onde:

ρ = é a massa específica dos materiais (g/cm³);

M = é a massa da amostra ensaiada (g);

Vi = volume inicial de xilol no frasco (cm³);

Vf = volume após colocação do material no frasco com xilol (cm³).

2.2.2 Massa unitária

Para a determinação da massa unitária dos materiais foi utilizada a norma NM 45 (ABNT, 2006) - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. A amostra a ser ensaiada foi colocada em um recipiente com volume conhecido, com o auxílio de uma concha da seguinte forma: o agregado foi lançado de uma altura de 12 cm do topo do recipiente. Após o recipiente estar cheio a superfície foi alisada com uma régua tomando como limite as bordas da caixa (rasou-se o topo com uma régua). O recipiente foi pesado (kg) com o material nele contido. A massa do agregado (Ma) é a diferença entre o recipiente cheio e vazio. Foram feitas três determinações com amostras distintas Ma1, Ma2 e Ma3. A massa unitária Eq. (2) é a média de três determinações dividindo-se a média das massas pelo volume do recipiente utilizado.

$$\rho\mu = \frac{\rho\mu_1 + \rho\mu_2 + \rho\mu_3}{3} \quad (2)$$

2.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

2.3.1 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Foi utilizado um equipamento Rigaku, modelo ZSX Mini II operando em uma tensão de 40 kV e corrente de 1,2mA, equipado com tubo de paládio.

2.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Para determinação da atividade pozolânica dos PCC's, foi realizado o ensaio de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014) – Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de Atividade Pozolânica.

Nesta metodologia, são confeccionadas duas argamassas com traço 1:3 (cimento: areia normal). Na primeira argamassa foi usado apenas cimento Portland e, na segunda, 35% do volume absoluto do cimento foi substituído pela pozolana. A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos-de-prova foram feitas seguindo a NBR 7215 (ABNT, 1996) - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Na execução do ensaio, foi determinada a quantidade de água para um índice de consistência de 225 ± 5 mm de acordo com as prescrições estabelecidas pela norma.

Para cada tipo de argamassa foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm. A cura inicial ocorreu dentro dos moldes, em câmara úmida, com temperatura de (23 ± 2) °C. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em ambiente hermeticamente fechado, permanecendo estanques com temperatura de (38 ± 2) °C, por um período de 27 dias. Aos 28 dias, os corpos de prova, já resfriados, foram capeados. Por fim, foi realizado o ensaio de resistência à compressão.

O índice de atividade pozolânica é a razão entre a resistência média dos corpos de prova moldados com a substituição de pozolana pela resistência média dos corpos de prova moldados com cimento, sendo seu resultado apresentado em percentual, Eq. (3).

$$IAP\% = \frac{f_{CP}}{f_{CC}} \times 100 \quad (03)$$

Onde:

f_{CP} - resistência à compressão média, aos 28 dias, de três corpos de prova moldados com cimento Portland e material pozolânico – argamassa A;

f_{CC} - resistência à compressão média, aos 28 dias, de três corpos de prova moldados somente com cimento Portland como material cimentício – argamassa B.

2.4.1 Conversão do traço em volume para massa

Nesta pesquisa foram utilizadas argamassas na proporções 1:1:6 (cimento: PCC's: cal: areia) em massa, respectivamente. Tem-se as argamassas de referência que são as sem adição mineral (sem PCC's) e as argamassas com produto da combustão mineral com percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. O traço utilizado foi devido ser usado comercialmente em argamassa para revestimento.

Após determinação da proporção fez-se necessário a transformação das medidas de volume para massa, ou seja, transformar as medidas de m³ para kg.

2.4.2 Preparo das argamassas

Neste trabalho foram confeccionadas argamassas de referência (sem substituição) e alternativas que utiliza os PCC's como substituinte de parte do aglomerante (cimento) nos percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%.

Os materiais foram pesados em balanças devidamente calibradas e em seguida, homogeneizadas em um misturador mecânico (argamassadeira) de eixo vertical com capacidade de 5 litros, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 1996).

Após o preparo das misturas, em moldes prismáticos com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm (Fig.1) foram confeccionados corpos de prova, os quais foram desmoldados após 24h. Após a desmoldagem os corpos de prova foram identificados e em seguida submetidos a períodos de cura de 7 e 28 dias de idade.

2.5 MÉTODOS DE ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

2.5.1 Argamassa no estado fresco

2.5.1.1 Índice de consistência

A Norma NBR 13276 (ABNT, 2005) foi utilizada neste ensaio visto que prescreve o método de determinação do teor de água na preparação de argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos. O princípio do ensaio consiste em medir o índice de consistência com a utilização da mesa de consistência, também conhecida como *flow table*, descrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996). O índice de consistência padrão proposto pela norma NBR 13276 (ABNT, 1995) é 255 ± 10 mm, sendo este o valor utilizado.

A argamassa foi moldada em três camadas, sendo a primeira com 15 golpes, a segunda com 10 golpes, a terceira com 5 golpes e por fim retirado o excesso. Em seguida retira-se o molde tronco-cônico e inicia-se o processo de espalhamento através de 30 golpes em 30s e logo em seguida medem-se os diâmetros ortogonais da argamassa após a deformação, sendo a média dessas medidas o índice de consistência padrão.

2.5.2.1 Argamassa no estado endurecido

2.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas formuladas foram realizados aos 7 e 28 dias de cura, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) – Argamassa para assentamento revestimento de paredes e tetos, em uma prensa de ensaio universal EMIC, modelo DL 1000.

2.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Após o tempo de cura de 28 dias das argamassas, foi necessário avaliar suas propriedades cerâmicas e verificar como se comportavam para diferentes teores de PCC's. Portanto, foram realizadas análises tais como: absorção de água (g/cm^3), índice de vazios (g/cm^3) e massa específica (g/cm^3). Estes ensaios estão de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Os corpos de prova foram colocados na estufa e mantidos a uma temperatura de 105 ± 5 °C por 72h e determinadas as massa das amostras (M_s). Em seguida, as amostras foram imersas em água à uma temperatura de 23 ± 2 °C e mantidas durante 72h nesta condição. Ao completar a etapa de saturação as amostras foram mantidas em ebulição durante 5h e deixadas esfriar naturalmente para serem determinadas as massas (M_i) com auxílio de uma balança hidrostática. Por fim, as amostras foram retiradas da água e enxutas com um pano para serem determinadas

suas massas (M_{sat}).

A absorção por imersão AI é calculada através da Eq. (4)

$$AI = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

AI = absorção de água por imersão;

M_{sat} = massa da amostra saturada em água;

M_s = massa da amostra seca em estufa;

O índice de vazios das argamassas é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, com aplicação da Eq. (5):

$$Iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

Iv = índice de vazios;

M_i = massa do corpo-de-prova saturado imersa em água após fervura.

Tomando-se as orientações efetuadas através dos procedimentos e as medidas necessárias conforme NBR 9778 (ABNT, 2005), foi determinado a densidade (P_s) através da Eq. (6):

$$P_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (6)$$

2.8 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para aprofundar a análise das argamassas no seu estado endurecido, foi realizada a análise de sua microestrutura utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Philips XL 30. Foram utilizados os mesmos corpos de prova utilizadas no ensaio de compressão para cada traço. Em cada amostra foi feito o recobrimento com carbono grafite na superfície de fratura para realizar a análise. A análise da composição química elementar pontual das amostras, foi feita por Espectroscopia de Raios – X por Energia Dispersiva (EDS) – acoplado ao MEV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Massa específica e massa unitária

A Tabela (1) apresenta os resultados das massas específicas e massas unitárias dos materiais utilizados na pesquisa.

Tabela 1 - Massa específica e massa unitária dos materiais

| Materiais | Massa específica (g/cm ³) | Massa unitária (g/cm ³) |
|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| | NBR 9776 (1987) | NBR 7251 (1982) |
| PCC's | 2,13 | 0,59 |
| Cimento | 3,17 | 1,04 |
| Cal | 2,01 | 0,73 |
| Areia | 2,61 | 1,48 |

Fonte: Elaborado pelos autores,2020

Os resultados encontrados mostram que a massa específica dos PCC's é inferior à massa específica da areia e do aglomerante cimento. Com relação à massa unitária, os resultados mostram que os PCC's possuem uma massa unitária menor do que a dos aglomerantes e do agregado miúdo. A massa unitária é de grande importância devido à sua utilização na transformação de traços em volume para traços em massa.

3.1.2 Fluorescência de raios-X e Difração de raios-X

3.1.2.1 Produto da Combustão do Carvão Mineral (PCC's)

Os altos teores de SiO₂ e Al₂O₃ encontrados nos PCC's conferem a estes um grande potencial de aplicação como matéria-prima na produção de argamassas e concreto. Os resultados da análise química por fluorescência de raios-X dos PCC's estão apresentados na Tab. (2).

Tabela 2 - Composição química dos PCC's

| Componente | Massa % |
|--------------------------------|---------|
| SiO ₂ | 41,648 |
| Al ₂ O ₃ | 22,166 |
| Fe ₂ O ₃ | 16,733 |
| K ₂ O | 7,722 |
| CaO | 6,481 |
| SO ₄ | 1,589 |

Fonte: Elaborado pelos autores,2020

Quase 65% da composição deste material apresenta sílica - SiO₂ (41,65%) e alumina- Al₂O₃ (22,17%) como óxidos principais, sendo esta característica esperada, uma vez que estes são os principais constituintes dos produtos da combustão do carvão mineral. Os altos teores de SiO₂ e Al₂O₃ encontrados nos PCC's conferem a estes um grande potencial de aplicação como matéria-prima na produção de argamassas e concreto. Outro aspecto relacionado às concentrações de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ está no fato de que a soma destes óxidos pode classificar o produto da combustão do carvão mineral como classe C na classificação de materiais pozolânicos, uma vez que apresentam a soma de suas concentrações maior que 70% que é o valor mínimo requerido na normalização, evidenciando propriedades cimentantes e pozolânicas.

3.1.2.1.1 Cimento

Na Tabela (3) estão listados os resultados da composição química do CP II F – 32. Analisando-se estes dados, pode-se observar que o cimento apresenta maiores teores de óxido de cálcio e de dióxido de silício, correspondendo a 74,35% e 12,28% respectivamente, estando os demais óxidos com valores abaixo de 7%. De acordo com os resultados da composição química é possível recomendar a utilização deste cimento, por apresentar grande percentual de óxido de cálcio, para produção de argamassas de assentamento e revestimento, concretos simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento, dentre outros (POUEY, 2006).

Tabela 3 - Composição química do cimento Portland CP II F – 32

| Componente | Massa % |
|--------------------------------|---------|
| CaO | 74,3496 |
| SiO ₂ | 12,284 |
| Fe ₂ O ₃ | 5,1783 |
| SO ₃ | 3,4942 |
| Al ₂ O ₃ | 2,8748 |

Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

3.1.2.1.2 Cal

Na Tabela (4) estão apresentados os valores da composição química da cal.

Tabela 4. – Composição química da cal

| Componente | Massa % |
|--------------------------------|---------|
| CaO | 98,8549 |
| SiO ₂ | 0,6425 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,3665 |
| K ₂ O | 0,0717 |
| SrO | 0,0644 |

Fonte: Elaborado pelos autores,2020

De acordo com esta composição a cal pode ser considerada como sendo calcítica por apresentar como principal composto o óxido de cálcio. Esta composição favorece a utilização desta cal para produção de argamassas de assentamento e revestimento (SILVA, 2006).

3.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA

O valor obtido para o índice de atividade pozolânica para o produto da combustão do carvão mineral com o cimento, foi de 98,49 % sendo maior que o valor estabelecido pela norma NBR 5752 (ABNT, 1992), que é de 75%. Portanto, assume-se que os produtos da combustão do carvão mineral em questão podem ser caracterizados como um material pozolânico e utilizados como substituto parcial do cimento.

3.3 ENSAIOS COM AS ARGAMASSAS

3.3.1 Argamassa no estado fresco

3.3.1.1 Índice de consistência

A Tabela (5) apresenta os valores para relação água/aglomerante e índice de consistência das argamassas. Observa-se para a relação água/aglomerante que conforme aumenta a porcentagem de finos, há um aumento na quantidade de água utilizada para se obter o índice de consistência desejado. Provavelmente isso ocorreu devido à elevada superfície específica dos materiais aglomerantes, pois a cinza e a cal são materiais com mais finos que o cimento, existindo uma relação entre a quantidade de finos e a necessidade de água.

Tabela 5 - Relação água/cimento e índice de consistência das argamassas

| Traço | PCC's (%) | Relação Água/aglomerante | Índice de Consistência (mm) |
|------------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------------|
| 1:1:6 (Cimento:cal:areia) | 0 | 1,25 | 260 |
| | 10 | 1,30 | 254 |
| | 20 | 1,32 | 261 |
| | 30 | 1,34 | 256 |
| | 40 | 1,35 | 259 |
| | 50 | 2,00 | 253 |

Fonte: Próprio autor, 2020

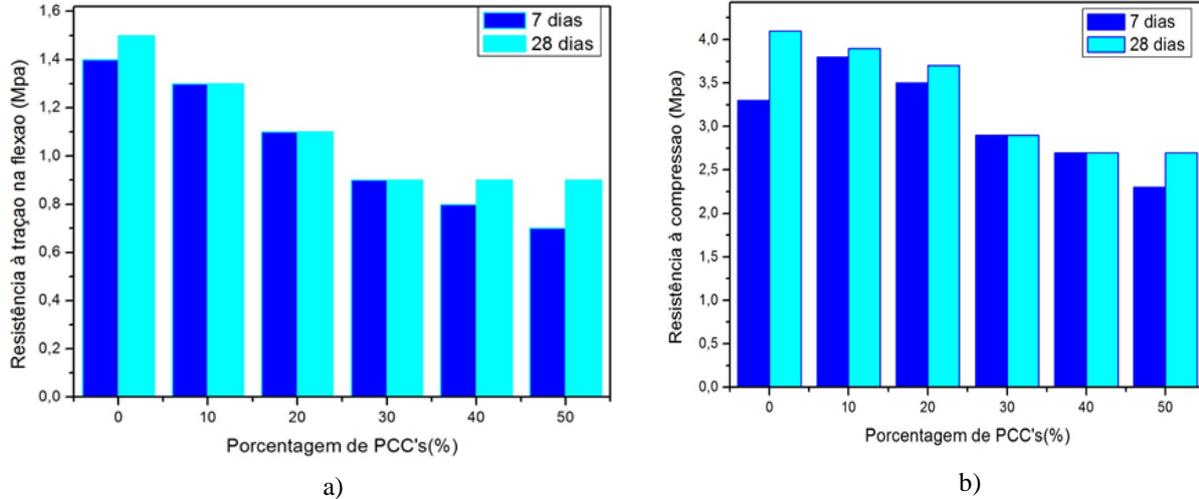
3.3.2 Argamassa no estado endurecido

3.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 5 mostra os resultados da resistência à tração na flexão e resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura. Para o ensaio de resistência à tração, observa-se que todas as argamassas com adição dos PCC's apresentaram resultados inferiores quando comparadas

com argamassa de referência.

Figura 2- a) Resistência à tração na flexão para argamassas 7 e 28 dias de cura b) Resistência à compressão para argamassas 7 e 28 dias de cura



Fonte: Elaborado pelos autores,2020

Nota-se que aos 28 dias de cura há um pequeno ganho na resistência à tração na flexão tanto para a argamassa de referência quanto para os teores de 40% e 50% de PCC's que é originado pelas diversas reações de hidratação de ocorrem no material. observa-se que a tensão ruptura apresentou um comportamento semelhante ao da resistência à tração na flexão. Esta situação pode ter como causas vários fatores. Em primeiro lugar, as partículas do cimento possuem superfície específica maior do que a dos PCC's, causando um não preenchimento dos vazios pelos grãos finos dos PCC's. Além disso, o aumento da quantidade de água utilizada gerou a perda de resistência das argamassas, que é originado pelas diversas reações de hidratação que ocorre no material.

A Tabela 6 apresenta os valores da resistência à compressão segundo a norma NBR 13281(ABNT, 1995). Analisando-se as exigências físicas e mecânicas para argamassas industrializadas, especificadas para assentamento de paredes e revestimentos de tetos e paredes, observa-se que todas as argamassas produzidas neste trabalho, atendem aos limites de $\geq 0,1$ e < 4 MPa, o que as classifica como do Tipo I.

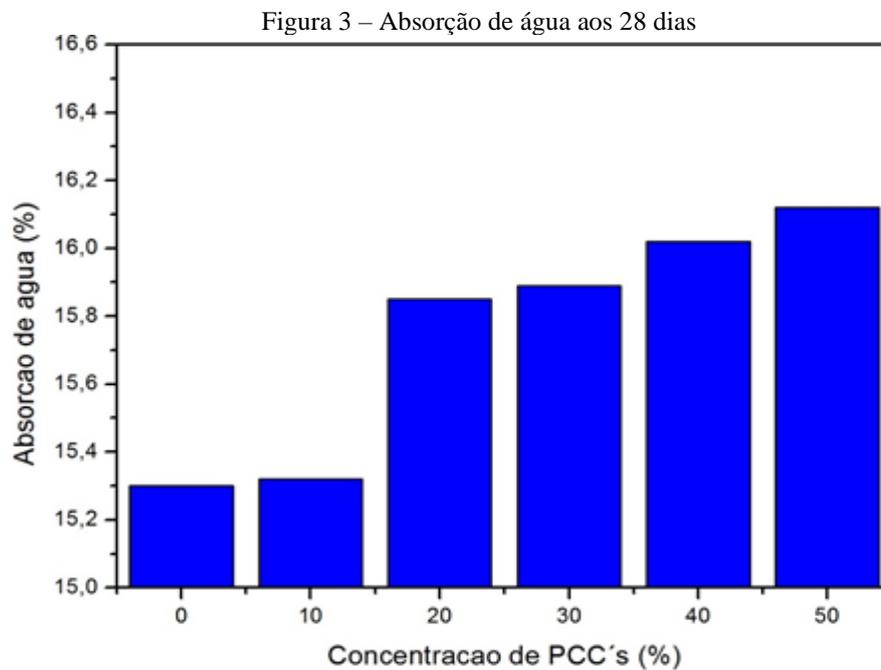
Tabela 6 - Resistência à compressão (MPa) de acordo com a norma NBR 13281

| Limites | Tipos de argamassa |
|---------------------|--------------------|
| $\geq 0,1$ e < 4 | I |
| ≥ 4 e ≤ 8 | II |
| ≥ 8 | III |

Fonte: NBR 13281(ABNT, 1995)

3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

A Fig. 3 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água, realizada nos corpos-de-prova aos 28 dias

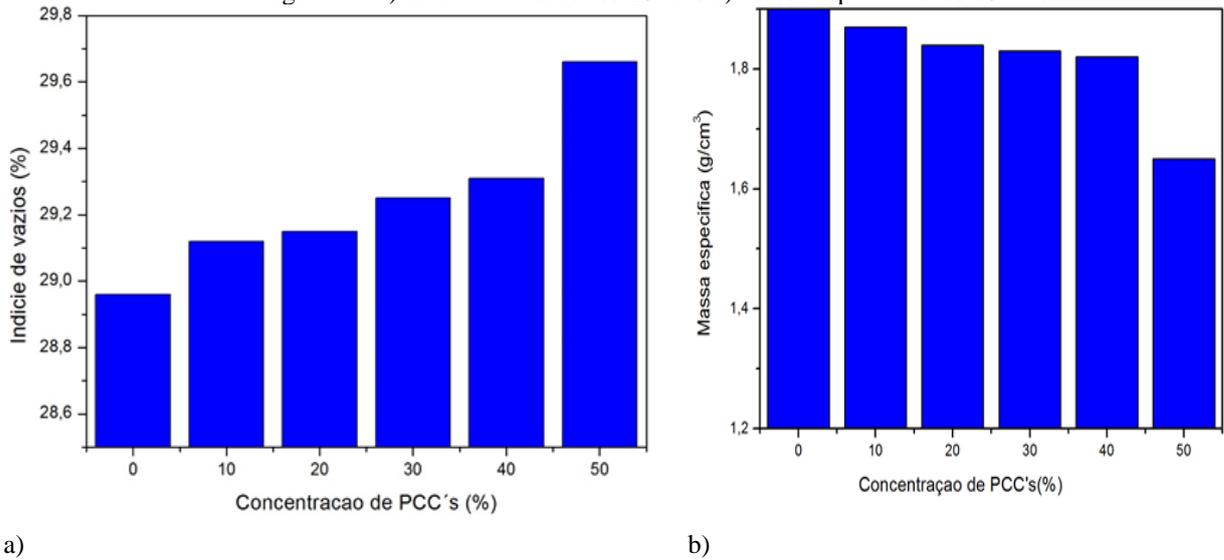


Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

Ao observar a Fig. 3 percebe-se que a absorção por imersão das argamassas aumentou com substituição do cimento Portland pelos produtos da combustão do carvão mineral, confirmando os resultados encontrados por Lenzi (2001). A maior absorção pode ser atribuída ao maior teor de finos devido ao aumento no teor dos PCC's nas argamassas. Segundo Scandolaro (2010), o acréscimo na absorção de água quando aumentada a relação água/aglomerantes é um dos fatores que influenciam esta propriedade sobre os materiais cimentícios. Devido ao excesso de água presente na argamassa, a quantidade que não reagiu para a formação dos hidratos será expelida, formando vazios na matriz de cimento endurecida.

A Figura 4 representa o índice de vazios e a massa específica aos 28 dias. A argamassa de referência apresentou a menor porosidade, fato este ligado à menor quantidade de finos quando comparada aos demais traços. Os valores da massa específica apresentam um decréscimo com a incorporação dos produtos da combustão do carvão mineral, que é justificada pela diferença existente entre os valores das massas específicas dos materiais utilizados. Com isso, o acréscimo de PCC's nas argamassas contribui para o aumento do índice de vazios e consequentemente o aumento no teor de absorção.

Figura 4 – a) Índice de vazios aos 28 dias b) Massa específica aos 28 dias



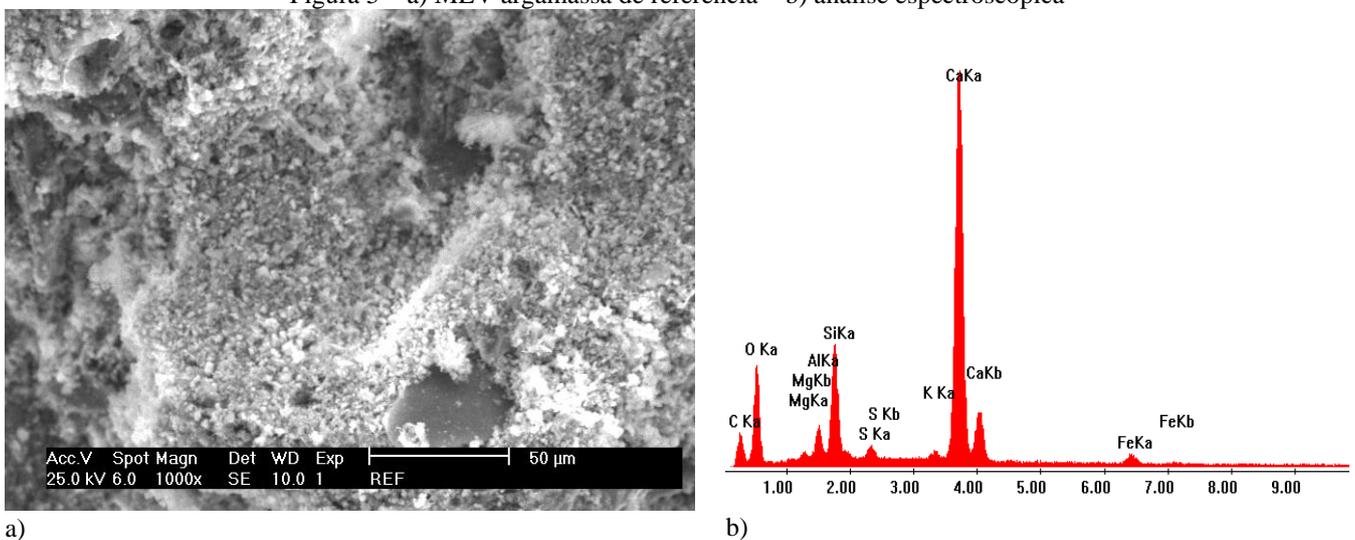
Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

3.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 5 representa imagem obtida por MEV da superfície fraturada da argamassa de referência e sua análise espectroscópica.

Verifica-se a pouca formação de poros. Observa-se também a presença de quartzo, matriz de cimento e a formação da portlandita. O espectro de análise EDS apresentado no Fig. 5b apresenta a concentração dos elementos químicos encontrados na região central da Fig. 5a, detectando a presença dos seguintes elementos: cálcio, silício, alumínio, potássio, carbono, ferro, enxofre, oxigênio e magnésio, sendo o cálcio em maior concentração, fato ligado possivelmente à formação da portlandita.

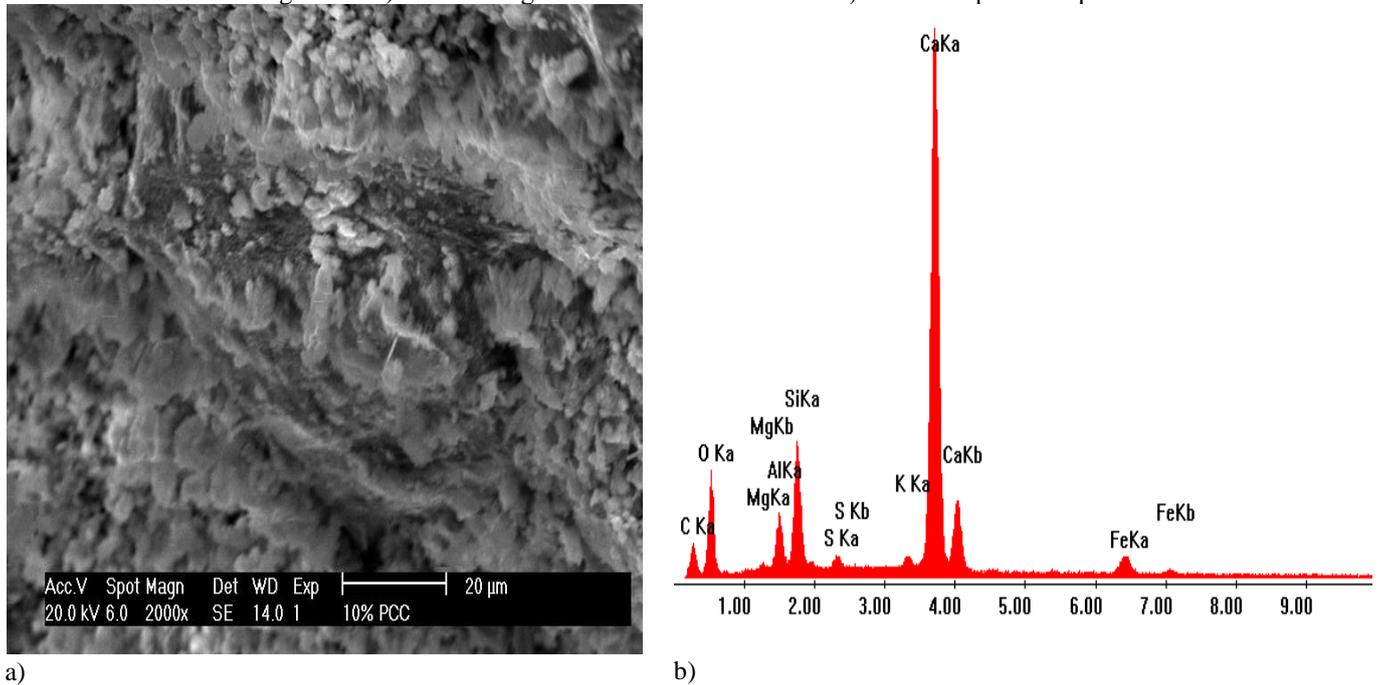
Figura 5 – a) MEV argamassa de referência b) análise espectroscópica



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

A Figura 6 apresenta a imagem obtida por MEV da argamassa com adição de 10% de PCC's em relação ao cimento, além da análise espectroscópica.

Figura 6 – a)MEV da argamassa com 10% de PCC's b) Análise espectroscópica

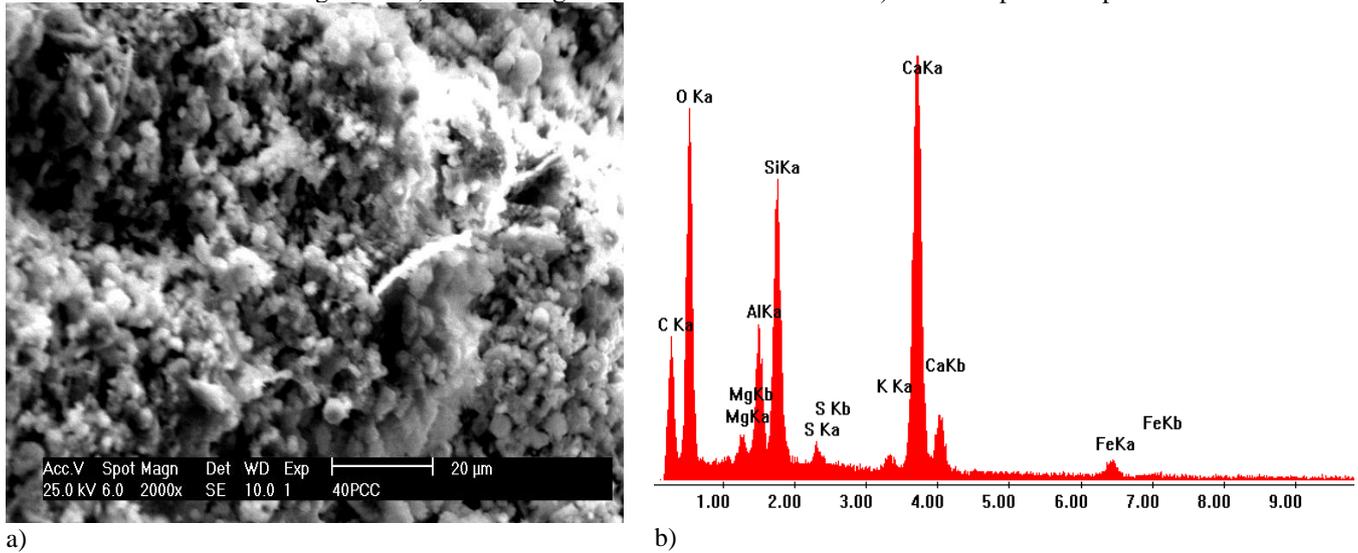


Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

Pode-se verificar que há uma melhor homogeneização na mistura e pouca presença de poros, O espectro da análise EDS apresentado na Fig. 6b aponta a concentração dos elementos químicos encontrados na região da Fig. 6a detectando a presença dos seguintes elementos: cálcio, silício, carbono, ferro, oxigênio, magnésio e potássio. O cálcio e o silício estão presentes em maior concentração, fato ligado, possivelmente à formação do silicato de cálcio hidratado.

A Figura 7 a) apresenta a imagem obtida por MEV da argamassa com adição de 50% de PCC's em relação ao cimento. A formação de poros é maior quando comparado com a argamassa de referência e com adição de 10% de PCC's devido à maior quantidade de resíduo adicionado. O espectro da análise EDS mostrado na Fig. 7b) apresenta a concentração dos elementos químicos encontrados na região central da Fig. 7a), detectando a presença dos seguintes elementos: cálcio, silício, alumínio, ferro, potássio, magnésio, silício, oxigênio, carbono, enxofre, sendo cálcio e silício em maior concentração devido à formação do silicato de cálcio hidratado.

Figura 7 - a)MEV da argamassa com 50% de PCC's b) análise espectroscópica



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

A análise microestrutural das argamassas constatou que a substituição parcial do cimento por percentuais de produtos da combustão do carvão mineral, influencia na microestrutura das mesmas. No entanto, as argamassas produzidas com adição de 10% de PCC's apresentaram microestrutura mais densa que as produzidas com 50%.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise química dos produtos da combustão do carvão por fluorescência de raios-X demonstrou a cristalinidade desse material. Elevados teores de SiO₂ e Al₂O₃ conferem aos PCC's um grande potencial de aplicação como matéria-prima para a produção de argamassas.

De acordo com a norma NBR 5752 (ABNT,1992), os produtos da combustão do carvão mineral utilizados neste trabalho apresentam valor de índice de pozolanicidade maior que o mínimo estabelecido (75%), caracterizando esse material como pozolânico, podendo ser considerado adequado para uso como aglomerante na produção de argamassas.

As argamassas produzidas com adição dos PCC's apresentaram desempenho inferior ao da argamassa de referência em relação às propriedades de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Observa-se um pequeno aumento na resistência mecânica com o tempo. O aumento do teor dos produtos da combustão do carvão mineral na mistura é proporcional à redução na resistência, tanto à tração quanto à compressão dos corpos-de-prova.

Apesar da diminuição da resistência, os resultados demonstram a viabilidade da substituição de cimento pelos produtos da combustão do carvão mineral na produção de argamassas. De acordo com a norma NBR 13281, os resultados obtidos permitem classificar as

argamassas obtidas como do Tipo I. É conveniente ressaltar que a argamassa de referência também foi classificada como do Tipo II aos 7 dias. Esses resultados estão de acordo com outros publicados na literatura, onde foram utilizadas cinzas volantes na produção de argamassas.

As análises realizadas mostram que a tendência dos valores de resistência à compressão é aumentar conforme o avanço do tempo de cura, o que acontece devido às reações pozolânicas, que ocorrem pelo alto teor de sílica livre nas partículas dos PCC's, que reagem com o Ca(OH)_2 produzido pelas reações de hidratação do cimento.

Em relação à absorção de água e índice de vazios, observou-se um crescimento com adição dos produtos da combustão do carvão mineral. Já a massa específica aparente mostrou uma queda com a adição dos PCC's, devido ao efeito da incorporação de finos.

De um modo geral, as análises realizadas mostram que a produção de argamassa contendo os produtos da combustão do carvão mineral é promissora e sustentável devido à utilização de um material abundante e de baixo custo.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por viabilizar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

_____, NBR NM 23:Cimento, concreto e agregados. Rio de Janeiro, 2001.

_____, NBR NM 45: Determinação da massa unitária dos agregados. Rio de Janeiro, 2006.

_____, NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

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

_____, NBR 12653: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

_____, NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____, NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

_____, NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____, NBR 13281: Argamassa para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 1995.

_____, NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____, NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

COIMBRA, M. A., SANTOS, W. N., MORELLI, M. R., **Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil**. Cerâmica vol. 48, p. 306, 2002.

LENZI, E. J. **Influência do Uso de Cinzas da Combustão de Carvão Mineral em Argamassas de Revestimento**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.

MARGON, P. V., **Influência do uso de cinzas de carvão mineral de termoelétricas em argamassas de revestimentos: dosagem por curvas granulométricas**, Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, SC 2002.

POON, C. S., WONG Y. L., LAM, L. **The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars.** Construction and Building Materials, Vol. 11. Great Britain, p.383-393, 1997.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da cinza da casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006, 320p.

PRUDENCIO JUNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Cinzas da casca de arroz. Coletânea Habitar: Utilização de resíduos na construção civil.** Programa de Tecnologia de Habitação, vol. 4, pg. 242-246, Porto Alegre – RS: ANTAC, 2003.

SILVA, N. G. **Argamassa de Revestimento de Cimento, Cal e Areia Britada de Rocha Calcária.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR, 2006.

SCANDOLARA, J. P. **Propriedades de argamassas obtidas pela substituição parcial de cimento Portland por rejeitos particulados de tijolo.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT, Joinville. 2010.