

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
(PPGECiv)

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL EM
ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

Marielza Corrêa dos Reis

São Carlos
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
(PPGECiv)

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL EM
ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

Marielza Corrêa dos Reis

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Sheyla Mara Baptista Serra

Coorientador: Prof. Dr. João Vicente Zampieron

São Carlos
2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Marielza Correa dos Reis, realizada em 04/04/2019:

Prof. Dr. João Vicente Zampieron
UEMG

Prof. Dr. Jose Carlos Pajari
UFSCar

Prof. Dr. Bruno Luis Damini
USP

DEDICO ESSE TRABALHO
À MINHA FAMÍLIA,
MELHOR PARTE DE MIM.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado, guiando-me e livrando-me de todo o mal.

Aos meus pais, que tanto se doaram, que não mediram esforços para garantir a formação de suas filhas, sempre incentivaram a estudar e ensinaram muitas coisas.

À minha irmã Mariele Corrêa dos Reis, que sempre me ajudou e esteve comigo. Não mediu esforços para me auxiliar na concretização desse trabalho.

À minha mentora Professora Dr.^a Sheyla Mara Baptista Serra, pela orientação, confiança e amizade durante essa longa jornada. Agradeço imensamente por todo apoio e contribuições oferecidas para o desenvolvimento do trabalho, sou muito grata por tudo.

Ao Professor Dr. João Vicente Zampieron, pela coorientação e enorme apoio na realização dos experimentos na UEMG-Passos. Além da amizade e incentivo desde a iniciação científica, sem o senhor eu não teria concretizado o meu sonho.

Ao Professor Dr. Eliel Alves Ferreira pelo apoio e auxílio no desenvolvimento da análise de variância desse trabalho.

À Professora Dr.^a Sônia Lúcia Modesto Zampieron pelo apoio e paciência no desenvolvimento desse trabalho, e também pela amizade.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil – UEMG Passos, pela realização do desenvolvimento dos corpos de prova.

Ao Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, pela realização dos ensaios de FRX, DRX, MEV e EDS.

Ao grupo TOZZI por disponibilizar os Resíduos de Carvão Vegetal (RCV).

Ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGECiv), da Universidade Federal de São Carlos, pelo auxílio durante o desenvolvimento desta pesquisa e a CAPES pela colaboração.

Estendo o meu agradecimento a todos os meus amigos. Vocês fazem o caminho se tornar mais leve e feliz.

Por fim, agradeço a todos, que de alguma maneira, ajudaram-me para a realização deste trabalho.

REIS, Marielza Corrêa dos. **Incorporação de resíduos de carvão vegetal em argamassas cimentícias**. 2019. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2019.

RESUMO

Os sistemas construtivos demandam quantidades significativas de recursos naturais, entretanto, estes já começam a apresentar problemas quanto aos impactos provocados pela sua extração. A incorporação de resíduos agroindustriais, tais como o carvão vegetal, aos compósitos cimentícios pode apresentar soluções para minimizar tais problemas e ainda aproveitar subprodutos de outros setores. Além de ser renovável, o carvão vegetal possui grande potencial agrícola e industrial. Fazendo vistas a esse pressuposto, o presente estudo teve por objetivo avaliar o potencial do uso de resíduos de carvão vegetal (RCV) em substituição parcial a areia fina (em volume) sobre as propriedades das argamassas. Para tanto, foram realizados ensaios para avaliar a composição físico-química dos RCV e analisar seu potencial pozolânico, sem beneficiamento prévio. Foram confeccionados corpos de prova (CP) de argamassa com RCV nos teores de 0%, 10%, 20% e 30% em relação à areia fina, na relação água / aglomerante igual a 0,55. Após o tempo de cura de 7, 28 e 60 dias, os CP foram analisados por meio das técnicas de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, microscopia eletrônica de varredura (MEV) combinada com espectrometria de dispersão de raios-X (EDS), difração de raios-X (DRX), absorção de água, porosidade aparente e massa específica. Os resultados demonstraram que apesar dos RCV não se apresentarem como materiais pozolânicos, a incorporação destes é viável, o que é confirmado pela análise de variância (ANOVA), onde os índices estatísticos são significativos para o teor de 20% em substituição a areia fina, as quais produziram argamassas com valores de resistência à compressão em torno de 28 MPa, superiores às de referência. Tais resultados colaboram com pesquisas que confirmam a viabilidade da inclusão destes resíduos em matrizes cimentícias, os quais podem agregar valor a um material até então sem perspectiva de uso. A inserção de RCV além de diminuir o descarte de resíduos ao meio ambiente viabiliza a minimização de materiais não renováveis utilizados na construção civil, contribuindo com desenvolvimento sustentável do setor.

Palavras-Chaves: Matrizes cimentícias. Resíduos de carvão vegetal. Recurso renovável. Sustentabilidade. Meio Ambiente.

REIS, Marielza Corrêa dos. **Incorporation of charcoal waste into cement mortars**. 2019. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2019.

ABSTRACT

Construction systems require significant amounts of natural resources, however, these are already beginning to present problems regarding the impacts caused by their extraction. The incorporation of agroindustry's residues, such as charcoal, to cement composites can present solutions to minimize such problems and to take advantage of by-products from other sectors. In addition to being renewable, charcoal has great agricultural and industrial potential. Based on this assumption, the present study aimed to evaluate the potential of the use of charcoal waste (RCV) in partial replacement of fine sand (by volume) on the properties of mortars. For that, tests were carried out to evaluate the physicochemical composition of the RCV and to analyze its pozzolanic potential, without previous beneficiation. Mortar specimens (CP) with RCV were made at 0%, 10%, 20% and 30% in relation to the fine sand, in the water / binder ratio of 0.55. After the cure time of 7, 28 and 60 days, the CPs were analyzed by means of the techniques of resistance to axial compression, tensile strength by diametrical compression, scanning electron microscopy (SEM) combined with X-ray dispersion spectrometry (EDS), X-ray diffraction (XRD), water absorption, apparent porosity and specific mass. The results showed that although the RCVs do not present themselves as pozzolanic materials, their incorporation is feasible, which is confirmed by analysis of variance (ANOVA), where the statistical indices are significant for the 20% content in substitution for fine sand, which produced mortars with compressive strength values around 28 MPa, higher than the reference ones. These results contribute to research that confirms the feasibility of including these residues in cementitious matrixes, which can add value to a material until then without perspective of use. The inclusion of RCV in addition to reducing the waste disposal to the environment makes possible the minimization of non-renewable materials used in construction, contributing to the sustainable development of the sector.

Keywords: Cement matrix. Charcoal waste. Renewable resource. Sustainability. Environment

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: MEV: etringita e portlandita (a), C-S-H (b)..... | 20 |
| Figura 2: Zona de transição do agregado e pasta de cimento..... | 21 |
| Figura 3: Fluxo geral do processo de obtenção do carvão vegetal..... | 33 |
| Figura 4: Comparativo de rotas do carvão | 35 |
| Figura 5: Principais polos de consumo de carvão vegetal no Brasil. | 37 |
| Figura 6: Produção da silvicultura, por grupos de produtos..... | 37 |
| Figura 7: Processo do beneficiamento do carvão vegetal e comercialização. | 39 |
| Figura 8: Relação de finos gerados por carvão vegetal produzido. | 40 |
| Figura 9: Composição da área de árvores plantadas por tipo de proprietários..... | 43 |
| Figura 10: Participação dos grupos de espécies florestais segundo os produtos. | 43 |
| Figura 11: Consumo nacional de carvão vegetal, 2008-2016..... | 44 |
| Figura 12: Participação da madeira plantada na produção de carvão, 2008-2016. | 44 |
| Figura 13: Forno de Encosta..... | 47 |
| Figura 14: Fornos de “rabo-quente”. | 48 |
| Figura 15: Representação esquemática de forno retangular..... | 49 |
| Figura 16: Aplicação de carvão vegetal em laje de piso..... | 52 |
| Figura 17: Estrutura da pesquisa de mestrado..... | 54 |
| Figura 18: Variáveis do processo experimental..... | 55 |
| Figura 19: Fases do programa experimental..... | 56 |
| Figura 20: Sequência dos ensaios..... | 57 |
| Figura 21: Imagem por satélite da localização da carvoaria em relação ao município de Passos-MG..... | 58 |
| Figura 22: Beneficiamento do carvão vegetal pela empresa. | 59 |
| Figura 23: Barracão onde são armazenados os produtos e os rejeitos de carvão vegetal. ... | 60 |
| Figura 24: Galpão da empresa de carvoeira. | 60 |
| Figura 25: Fracionamento do carvão vegetal bruto. | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 26: Materiais derivados do beneficiamento do carvão: a) Carvão vegetal; b) Briquetes; c) Material fino. | 62 |
| Figura 27: Amostra em sacos de ráfia. | 63 |
| Figura 28: Materiais utilizados no ensaio de massa específica do cimento. | 64 |
| Figura 29: Homogeneização/quarteamento dos agregados. | 65 |
| Figura 30: Conjunto de peneiras e peneirador. | 66 |
| Figura 31: Análise granulométrica dos agregados. | 67 |
| Figura 32: Absorção dos agregados. | 67 |
| Figura 33: Secagem dos agregados em estufa. | 68 |
| Figura 34: Materiais usados na determinação da massa específica NBR 9776. | 69 |
| Figura 35: Etapas do ensaio de determinação da massa específica. | 69 |
| Figura 36: Etapas de determinação da massa unitária solta. | 70 |
| Figura 37: Materiais utilizados no ensaio do teor de material pulverulento. | 70 |
| Figura 38: Índice de atividade pozolânica: a) cimento CP II F-32; b) Corpos de prova. | 72 |
| Figura 39: Difrátômetro D8 ADVANCE Eco. | 73 |
| Figura 40: MEV INSPECT S50. | 75 |
| Figura 41: Amostra de RCV preparada para ensaio de MEV. | 75 |
| Figura 42: Massa de resíduos de carvão retida nas peneiras. | 76 |
| Figura 43: Etapas do ensaio de massa específica dos resíduos de carvão. | 76 |
| Figura 44: Argamassadeira planetária. | 77 |
| Figura 45: Moldes utilizados (a); moldagem das argamassas (b); moldes com argamassa (c) e acondicionamento em câmara úmida (d). | 79 |
| Figura 46: Máquina universal marca Forney. | 80 |
| Figura 47: Corpos de prova capeados. | 81 |
| Figura 48: Corpos de prova utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade: a) impermeabilização da amostra, b) amostras em contato com lâmina d'água. | 84 |
| Figura 49: Amostras de argamassas utilizadas no MEV. | 85 |
| Figura 50: Curva granulométrica dos agregados. | 90 |
| Figura 51: Difrátograma da amostra de RCV. | 93 |

| | |
|---|-----|
| Figura 52: Micrografia do RCV: a) mag 50x; b) mag 400x; c) e d) mag 1000x. | 94 |
| Figura 53: Microanálise EDS do RCV. | 95 |
| Figura 54: Análise granulométrica dos resíduos de carvão vegetal..... | 96 |
| Figura 55: Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 60 dias. | 99 |
| Figura 56: Correlações para a resistência à compressão das argamassas..... | 99 |
| Figura 57: Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias..... | 103 |
| Figura 58: Absorção de água aos 28 dias..... | 105 |
| Figura 59: Massa Específica aos 28 dias..... | 106 |
| Figura 60: Absorção capilar das argamassas. | 107 |
| Figura 61: Sortividade das argamassas..... | 107 |
| Figura 62: MEV com EDS, mag 1000x: a) 0%RCV, b) 10%RCV, c) 20%RCV, d) 30%RCV. | 108 |
| Figura 63: Micrografias da argamassa de referência: a) mag2000x; b) mag4000x e c) mag8000x..... | 109 |
| Figura 64: Micrografias da argamassa de referência (0% RCV): formação de CSH e CH, bolha de ar preenchida com etringita, pontos de microanálise EDS..... | 110 |
| Figura 65: Microanálise das diferentes regiões na argamassa de 0% RCV. | 111 |
| Figura 66: Micrografias da argamassa 10% RCV. | 112 |
| Figura 67: Microanálise das diferentes regiões na argamassa de 10% RCV. | 113 |
| Figura 68: Micrografias da argamassa 20% RCV. | 114 |
| Figura 69: Microanálise das diferentes regiões na argamassa de 20% RCV. | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: Exigências químicas e físicas dos materiais pozolânicos..... | 27 |
| Tabela 2: Desempenho dos fornos de carbonização no Brasil..... | 46 |
| Tabela 3: Balanço de massa e energia despendida e resultante no processo de carbonização em fornos retangulares de 160 estéreos..... | 50 |
| Tabela 4: Massa Específica CPV ARI..... | 64 |
| Tabela 5: Boletim Técnico Cimento Portland..... | 64 |
| Tabela 6: Ensaio para caracterização dos agregados..... | 66 |
| Tabela 7: Composições das argamassas..... | 78 |
| Tabela 8: Análise de variância..... | 86 |
| Tabela 9: Características físicas das areias..... | 88 |
| Tabela 10: Determinação da composição granulométrica pela NBR 7211 (ABNT, 2009). ... | 90 |
| Tabela 11: Índice de atividade pozolânica com cimento Portland..... | 91 |
| Tabela 12: Composição química do RCV..... | 92 |
| Tabela 13: Composição granulométrica do RCV..... | 96 |
| Tabela 14: Massa Específica RCV..... | 97 |
| Tabela 15: índice de consistência das composições de argamassa..... | 97 |
| Tabela 16: Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 7, 28 e 60 dias..... | 98 |
| Tabela 17: Análise de variância da variável resistência à compressão..... | 101 |
| Tabela 18: Teste de Hipótese..... | 101 |
| Tabela 19: Teste de comparação de médias das parcelas..... | 102 |
| Tabela 20: Teste de comparação de médias das subparcelas..... | 102 |
| Tabela 21: Indicadores da análise de variância..... | 103 |
| Tabela 22: Resultado da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias..... | 103 |
| Tabela 23: Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias..... | 104 |
| Tabela 24: Resultado obtidos no ensaio de resistência à compressão para determinação IAP..... | 128 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 25: Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 7 dias. | 129 |
| Tabela 26: Resultado obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 28 dias. | 129 |
| Tabela 27: Resultado obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 60 dias. | 129 |
| Tabela 28: Resultado obtidos no ensaio de Resistência à Tração aos 28 dias. | 130 |
| Tabela 29: Dados dos ensaios de absorção de água aos 28 dias..... | 131 |
| Tabela 30: Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias..... | 132 |

LISTA DE SIGLAS

ABEPD - Associação Brasileira de Produtores de Eucalipto para uso Doméstico

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

DEMA - Departamento de Engenharia de Materiais

DRX - Difractometria de Raios-X

EDX - Espectrometria por Fluorescência de Raios-X

GEE - Gases de Efeito Estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEF - Instituto Estadual de Floresta

LCE - Laboratório de Caracterização Estrutural

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

NBR - Norma Brasileira

NM - Norma Mercosul

RCV - Resíduo de Carvão Vegetal

SOF - Selo de Origem Florestal

SOFEX - Selo de Origem Florestal para Exportação

UEMG - Universidade do Estado de Minas Gerais

UFSCar - Universidade Federal de São Carlos

LISTA DE ABREVIATURAS E ELEMENTOS QUÍMICOS

°C - Graus Celsius

A - Absorção

a/ag – Relação água/aglomerante

a/c - Relação água/cimento

Al₂O₃ - Óxido de Alumínio (Alumina)

C - Carbono

Ca - Cálcio

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio (portlandita)

CASH – Etringita

CH – Portlandita, Hidróxido de cálcio

CH₄ – Gás Metano

CO₂ – Dióxido de carbono

CP – Corpo de Prova

CP V ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial.

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

D - Diâmetro do corpo de prova

F - Força máxima alcançada

fc - Resistência a compressão

fct,sp - Resistência a tração por compressão diametral

Fe₂O₃ - Óxido de ferro (hematita)

g - Gramas

H - Hidrogênio

H₂SO₄ - Ácido sulfúrico

H₀ - Hipótese nula

H₁ - Hipótese 1

Iv - Índice de vazios

K - Potássio

kg - Quilograma

kW – Quilowatts

m - metro

m³ - metro cúbico

MDC - Metro de Carvão

MF - Módulo de Finura

MgO - Óxido de magnésio

Mi - Massa imersa

mm - Milímetros

MPa - Megapascal

Ms - Massa seca

Msat - Massa saturada

N - Newtons

Na - SódioO₂ – Gás oxigênio

pH - Potencial Hidrogeniônico

Si - Silício

SiO₂ - Dióxido de silício (sílica)

SO₃ - Trióxido de enxofre (óxido sulfúrico)

sss - saturada superfície seca

st – Metro estéreo

tempo ^{1/2} - raiz quadrada do tempo em minutos

v – Volume

ZT - Zona de transição

ρ_{ap} - Massa específica aparente

ρ_r - Massa específica real

ρ_s - Massa específica seca

ρ_{sat} - Massa específica saturada

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA..... | 15 |
| 1.2 OBJETIVOS | 16 |
| 1.2.1 Geral | 16 |
| 1.2.2 Específicos | 16 |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... | 17 |
| 2. COMPOSTOS CIMENTÍCIOS E RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS..... | 18 |
| 2.1 ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS | 19 |
| 2.1.1 Classificação dos compostos cimentícios | 19 |
| 2.1.2 Microestrutura da matriz cimentícia | 19 |
| 2.1.3 Propriedades das argamassas | 22 |
| 2.1.4 Mecanismos de transporte de matrizes cimentícias..... | 25 |
| 2.2 ADIÇÕES MINERAIS..... | 25 |
| 2.2.1 Classificação das adições..... | 26 |
| 2.3 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS..... | 28 |
| 2.4 O CARVÃO VEGETAL | 31 |
| 2.4.1 Terminologia associada ao carvão vegetal..... | 32 |
| 2.4.2 Impactos Socioambientais..... | 34 |
| 2.4.3 Contexto econômico do carvão vegetal | 36 |
| 2.5 PROCESSO E PRODUÇÃO DO CARVÃO VEGETAL..... | 38 |
| 2.5.1 Variedades de carvão..... | 40 |
| 2.5.2 Matéria-prima para a produção de carvão vegetal..... | 42 |
| 2.5.3 Métodos de produção..... | 45 |
| 2.6 APLICAÇÕES DO CARVÃO VEGETAL..... | 51 |
| 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL | 53 |
| 3.1 VARIÁVEIS..... | 54 |
| 3.2 DETALHAMENTO DO EXPERIMENTO | 55 |
| 3.3 COLETA DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL..... | 58 |
| 3.3.1 Carvoaria..... | 58 |
| 3.3.2 Beneficiamento do carvão vegetal | 59 |
| 3.3.3 Descrição dos materiais | 60 |
| 3.3.4 Selos de certificação..... | 62 |
| 3.3.5 Seleção das amostras RCV para estudo | 62 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.4 | CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS | 63 |
| 3.4.1 | Cimento | 63 |
| 3.4.2 | Agregados | 65 |
| 3.4.3 | Resíduos de carvão vegetal (RCV)..... | 71 |
| 3.5 | ESTUDO EM ARGAMASSA..... | 76 |
| 3.5.1 | Materiais..... | 76 |
| 3.5.2 | Produção de argamassas..... | 77 |
| 3.6 | ENSAIOS NAS ARGAMASSAS..... | 79 |
| 3.6.1 | Ensaio de resistência à compressão axial de corpos de prova cilíndricos | 80 |
| 3.6.2 | Ensaio de resistência à tração por compressão diametral | 81 |
| 3.6.3 | Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica | 82 |
| 3.6.4 | Absorção de água por capilaridade | 83 |
| 3.6.5 | Microestrutura da matriz cimentícia | 85 |
| 3.7 | ANÁLISE ESTATÍSTICA | 86 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 88 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS..... | 88 |
| 4.1.1 | Composição Granulométrica dos agregados | 89 |
| 4.2 | CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL | 91 |
| 4.2.1 | Potencial Hidrogeniônico | 91 |
| 4.2.2 | Índice de Atividade Pozolânica | 91 |
| 4.2.3 | Espectroscopia de Fluorescência de raios-X (FRX)..... | 92 |
| 4.2.4 | Difratometria de raios-X (DRX) | 92 |
| 4.2.5 | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com microanálise EDS | 94 |
| 4.2.6 | Determinação da composição granulométrica dos resíduos de carvão vegetal .. | 95 |
| 4.2.7 | Massa Específica dos resíduos de carvão vegetal | 96 |
| 4.3 | PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS..... | 97 |
| 4.3.1 | Índice de Consistência..... | 97 |
| 4.3.2 | Resistência à Compressão | 98 |
| 4.3.3 | Análise de Variância | 100 |
| 4.3.4 | Resistência à Tração por Compressão Diametral..... | 103 |
| 4.3.5 | Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas | 104 |
| 4.3.6 | Absorção de água por capilaridade | 106 |
| 4.3.7 | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 108 |
| 4.4 | SUGESTÕES DE UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL..... | 115 |
| 5. | CONCLUSÕES..... | 117 |
| 5.1 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 118 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 119 |
| | APÊNDICE A – Dados de entrada dos corpos de prova para determinação IAP | 128 |
| | APÊNDICE B – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial | 129 |

| | |
|--|------------|
| APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de resistência à tração | 130 |
| APÊNDICE D – Dados dos ensaios de absorção de água por imersão | 131 |
| APÊNDICE E – Dados dos ensaios da absorção de água por capilaridade | 132 |

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, notou-se um aumento gradativo de descarte de diferentes resíduos no meio ambiente, assim como problemas oriundos da escassez de matérias-primas naturais no ramo da construção civil. Tais fatores vêm impulsionando o desenvolvimento de pesquisas nas universidades, centros acadêmicos, institutos e empresas na busca de alternativas específicas para o aproveitamento de resíduos agroindustriais como novos materiais, na tentativa de reduzir seu impacto ambiental (SAMPAIO; SOUZA; GOUVEIA, 2014).

O Brasil possui grande diversidade em resíduos agroindustriais que apresentam potenciais como elementos construtivos alternativos. Entretanto, nem todos os resíduos apresentam viabilidade técnica, ambiental e econômica para reaproveitamento. Dentre os resíduos agroindustriais reaproveitáveis, estão os oriundos da manufatura do carvão vegetal, atividade correspondente a 30% de todo carvão produzido em escala mundial (SILVA et al., 2014). O desenvolvimento e a aplicação de materiais de baixo custo e reduzido consumo de energia na engenharia civil, tornam-se viáveis.

Os materiais industrializados, também chamados convencionais, por sua vez, mobilizam vastos recursos financeiros, consomem muita energia de trabalho e requerem um processo centralizado. Segundo Pacheco-Torgal, Jalali (2010) e Sellami, Merzoud, Amziane (2013), a indústria da construção civil é responsável por uma grande quantidade de descartes de recursos não renováveis gerando milhões de toneladas de rejeitos minerais e emissões de dióxido de carbono. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2013), para cada tonelada de cimento produzido emite-se entre 600 kg e 900 kg de CO₂, um dos gases geradores do efeito estufa.

Assim, diante da crescente demanda por materiais sustentáveis para suprir tal descompasso ambiental, leva-se à necessidade de dados técnicos e científicos para garantir a qualidade e confiabilidade desses materiais. Além disso, a utilização de resíduos produzidos em larga escala poderá mitigar os impactos ambientais negativos resultantes da disposição destes no ambiente e agregar valor a um novo insumo.

Este estudo aborda as características regionais dos Resíduos de Carvão Vegetal (RCV), bem como os impactos que estes causam na região, a fim de nortear futuras pesquisas para possíveis aplicações e soluções na mitigação de problemas ecológicos.

Vários processos industriais geram diferentes tipos de resíduos e em quantidades

consideráveis, os quais prejudicam o meio ambiente. Diante de tal fato e da escassez de recursos naturais, se faz necessário a utilização de materiais alternativos em substituição destes, principalmente naquele considerado um dos maiores causadores, o setor da construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil consome quantidades significativas de recursos naturais. Dentre os recursos, os mais utilizados nas obras de construção são o cimento e os agregados de diferentes granulometrias. Os agregados miúdos possuem importância fundamental para proporcionar uma boa qualidade ao concreto, sendo que a areia natural é um dos mais utilizados. Em virtude da crescente demanda, as areias já começam a apresentar escassez (MOTA et al., 2017), impactando o meio ambiente com sua extração, assim, procura-se alternativas em relação aos impactos que a extração dos mesmos provoca na natureza (FERREIRA; DAITX, 2003).

Mota et al. (2017) ressaltam que a partir da realidade econômica e a precaução com a preservação do meio ambiente, vem crescendo o interesse pela procura de materiais alternativos que possam ser utilizados em substituição aos agregados ou ao aglomerante na produção de compósitos cimentícios.

Fazendo vistas à minimização do uso dos recursos não renováveis, pesquisas têm sido realizadas com a inserção de resíduos, gerados nos processos agroindustriais, em sistemas construtivos, o que daria uma contribuição à sustentabilidade ambiental (BAN; RAMLI, 2011).

O uso da biomassa agroindustrial ou de florestas de rápido crescimento, também denominadas como de curta rotação, é uma alternativa promissora do ponto de vista técnico e econômico, pelo grande volume de materiais que a construção civil demanda e pela valorização de tais resíduos no setor (SIQUEIRA et al., 2012) (TEIXEIRA et al., 2016).

Na produção de energia, a queima de biomassa provoca a liberação de dióxido de carbono na atmosfera, porém, como este composto foi previamente absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, o balanço de emissões de CO₂ é quase nulo (TEIXEIRA et al., 2016).

Neste cenário, a produção de carvão vegetal pode contribuir com o desenvolvimento sustentável quando produzido a partir de biomassa plantada (silvicultura) ou de áreas nativas com reposição florestal (áreas de manejo). Considerando a possibilidade de exaustão de fontes não renováveis e o aumento das pressões do governo e da sociedade

pelo maior aproveitamento de materiais, o carvão vegetal apresenta-se como uma fonte energética limpa (LAIRD, 2008).

O beneficiamento do carvão vegetal é realizado em carvoarias, onde são executadas as atividades produtivas desde o recebimento até o despacho final. Todavia, parte de sua produção é arcaica, apresentando problemas ambientais e sociais, por envolverem atividades insalubres e de baixo nível de capacitação técnica (SILVA et al., 2014).

Ao decorrer do processo são geradas significativas quantidades de resíduos. De acordo com alguns autores, tais resíduos podem conter metais, que causam poluição e são responsáveis por graves problemas ambientais. No âmbito ambiental, a incorporação ou estabilização de um resíduo, com alta finura e baixa densidade, como um material de construção, contribuiria ecologicamente com o crescimento sustentável da indústria geradora e economicamente com a redução de custos com matéria-prima na confecção dos compósitos cimentícios, minimizando as agressões ambientais proveniente de seu descarte inadequado (LIMA; ROSSIGNOLO, 2010).

Na literatura é possível encontrar diversas pesquisas que estão sendo desenvolvidas com resíduos agroindustriais para seu reaproveitamento em matrizes cimentícias, porém, poucas foram as pesquisas desenvolvidas com resíduos de carvão vegetal (RCV), mesmo que com fins diversos aos da construção civil.

Diante de tal circunstância, o trabalho pretendeu avaliar o potencial dos resíduos de carvão vegetal em substituição parcial à areia fina em matrizes cimentícias. Tal incorporação abrange dois temas importantes: a possibilidade de utilização de um resíduo gerado em larga escala no Brasil e sua influência nas propriedades das argamassas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar o potencial de substituição dos resíduos de carvão vegetal em volume à areia fina, sobre as propriedades das argamassas, em quatro níveis de adição, sendo eles, os exemplares de referência (0% RCV) e os demais contendo 10%, 20% e 30% de RCV.

1.2.2 Específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

- Analisar a reatividade pozolânica dos resíduos de carvão vegetal (RCV).

- Reduzir o consumo de matéria prima natural, não renovável, usada na confecção de argamassas;
- Avaliar a suscetibilidade da argamassa de referência e as contendo RCV ao transporte de líquidos por meio dos ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade.
- Reutilizar os resíduos de carvão vegetal resultando na economia de áreas destinadas à sua disposição como rejeito.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação estruturou-se em seis capítulos. O primeiro capítulo é a introdução, onde é abordada a importância e a justificativa para substituição parcial de areia fina por resíduos de carvão vegetal e os objetivos gerais e específicos.

No segundo capítulo são abordados os fatores conceituais referentes aos compósitos cimentícios e os conceitos referentes às adições e reaproveitamentos, em especial aos resíduos do carvão vegetal, frente às variáveis estudadas.

O terceiro capítulo apresenta o método experimental em que são descritos as variáveis, os materiais empregados e os procedimentos de ensaios.

No quarto capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais. Estes são comparados com outros trabalhos e integrados entre si, para analisar a dependência das variáveis.

As conclusões são abordadas no quinto capítulo, fazendo um resumo dos resultados obtidos e apresentando as sugestões para futuras pesquisas.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração da pesquisa, seguidas pelos Apêndices que colaboraram no desenvolvimento da pesquisa.

2. COMPOSTOS CIMENTÍCIOS E RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

A indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais. A utilização desses recursos naturais ocorre, principalmente, na produção de cimento e no beneficiamento de agregados, pedra britada e areia, visando à produção de compostos cimentícios, argamassas e concretos (MALTA; SILVA; GONÇALVES, 2013).

Os impactos gerados pela construção civil, no aspecto técnico, se agravam pelo uso e desenvolvimento insuficiente de novas tecnologias mais racionalizadas, desperdício de materiais e baixa qualificação profissional. O consumo excessivo de materiais e o alto índice de perdas promovem um acréscimo no custo total dos empreendimentos, visto que muitos materiais e elementos construtivos não atendem às especificações técnicas (MALTA; SILVA; GONÇALVES, 2013).

Para Camioto et al. (2014), no que diz respeito aos sistemas construtivos, a produção sustentável é a criação de bens através de processos e sistemas que não são poluentes, que conservam energia e recursos naturais de forma economicamente viável.

Diante dos diversos impactos ambientais e da escassez de recursos naturais, se faz necessário a utilização de materiais alternativos em substituição destes. Nesse sentido, várias pesquisas têm sido propostas para estudar e apresentar dados para viabilizar a reutilização de materiais que seriam descartados, tais como a produção de concreto leve contendo carvão vegetal, argila expandida e EPS em substituição ao agregado graúdo (BELINE et al., 2015).

Todo processamento industrial ou agroindustrial gera resíduos de suas matérias-primas, os quais, na maioria das vezes podem ser empregados na indústria da construção civil em adição ou substituição de algum insumo básico. Do ponto de vista empresarial é extremamente vantajoso, pois esta ação reduz a necessidade de exploração de recursos naturais, consumo de energia e redução no volume de aterros sanitários. É necessário, contudo, realizar ensaios e buscar dados que permitam o uso das alternativas com segurança e desempenho técnico adequado.

2.1 ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

A mistura em proporção adequada de cimento, agregados miúdos e água resultam em um dos materiais de construção, a argamassa, cujas características diferem substancialmente das apresentadas pelos elementos que a constituem.

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), a argamassa é uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerante inorgânico e água, contendo ou não aditivo ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento e pode ser dosada em obra ou em instalação própria.

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS COMPOSTOS CIMENTÍCIOS

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os compostos cimentícios são classificados em três categorias de acordo com sua massa específica são:

- *Leve*: 1800 kg/m³.
- *Normal*: 2400 kg/m³.
- *Pesado*: 3200 kg/m³.

Os compostos cimentícios são classificados quanto a sua resistência à compressão em:

- *Baixa resistência*: para valores de resistência à compressão inferiores a 20 MPa.
- *Resistência moderada*: resistência à compressão de 20 MPa à 40 MPa.
- *Alta resistência*: para valores de resistência à compressão superiores a 40 MPa.

2.1.2 MICROESTRUTURA DA MATRIZ CIMENTÍCIA

As matrizes cimentícias são compostas basicamente por cimento, agregados, adições, aditivos e água. O cimento é o elemento responsável por aglomerar as partículas e ligá-las por meio da formação de produtos hidratados (CINCOTTO, 2014). Quando disperso em água, seus componentes, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio são dissolvidos e a solução fica saturada com diversas espécies iônicas. Dentro de poucos minutos ocorre a interação dos íons hidroxila com o cálcio, aluminatos e sulfatos, promovendo a formação do primeiro composto hidratado (etringita), que são cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado. Após algumas horas são formados grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (portlandita, CH) e pequenos hidratos de silicato de cálcio (C-S-H). Dependendo da relação alumina-sulfato do cimento, após alguns dias do início da

hidratação, a etringita pode se tornar instável, reagir e formar o monossulfatoaluminato hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

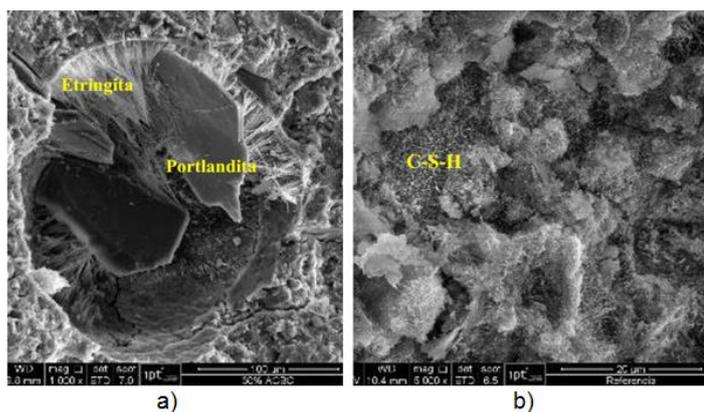
O principal produto de hidratação de uma pasta de cimento é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Esse sólido é responsável pela resistência e durabilidade ao longo do tempo, e compõe de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento. O C-S-H não é um composto bem definido, pois sua relação Ca/Si e o conteúdo de água variam, impactando assim sua morfologia. O C-S-H pode se apresentar desde a forma de fibras pouco cristalinas até rede reticulares (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A portlandita (CH), diferente do C-S-H, é um produto de hidratação de estequiometria definida, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Compõe de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento e possui morfologia de placas hexagonais empilhadas (TANCREDI, 2010). Esse composto possui área superficial menor que o C-S-H e contribui pouco para a resistência da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A etringita ocupa de 15% a 20% do volume sólido de uma pasta de cimento e possui papel secundário na microestrutura e propriedades da matriz. Se apresenta como cristais prismáticos aciculares podendo reagir e se transformar em monossulfato hidratado, o qual vulneraliza a matriz ao ataque por sulfatos (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Na Figura 1 visualiza-se a morfologia dos principais produtos de hidratação do cimento, a etringita, portlandita (CH) e o C-S-H obtida por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura 1: MEV: etringita e portlandita (a), C-S-H (b).



Fonte: Moretti (2018).

Além dos produtos de hidratação, podem ser encontrados, na fase sólida, grãos anidros de cimento na microestrutura, no entanto, a fase porosa contém vazios preenchidos de água ou ar, que podem afetar as propriedades físicas e químicas (TANCREDI, 2010).

A porosidade interfere diretamente na resistência mecânica, módulo de elasticidade, retração, propriedades térmicas e durabilidade. Na pasta de cimento são encontrados vários

tipos de poros, os quais influenciam de maneira diferente nas propriedades. Os principais poros são: os poros gel ou entre camadas de CSH que são vazios capilares, e os poros de ar incorporados (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Os materiais com fases amorfas se caracterizam por apresentarem em seus difratogramas curvas com formas abauladas com ausência de picos, enquanto que os materiais com fases cristalinas se caracterizam por apresentarem formas com intensa quantidade de picos em seus difratogramas (CUNHA, 2017).

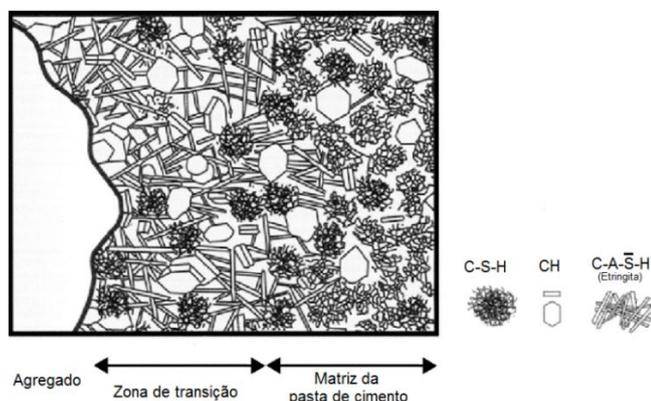
Um sólido cristalino é constituído por um arranjo de átomos ordenados com regularidade periódica numa rede tridimensional (rede cristalina). Quando um feixe de raio-X monocromáticos é incidido sobre os átomos, os elétrons absorvem essa radiação, vibram e emitem ondas com a mesma frequência em diversas direções. A superposição dessas ondas resulta na difração (GOMES, 2015).

O emprego do microscópio eletrônico de varredura (MEV) permite evidenciar a morfologia dos compostos hidratados das matrizes cimentícias em função das condições de hidratação. A observação microscópica possibilita a identificação de três fases do corpo de prova: agregado, matriz da pasta de cimento e a interface pasta agregado denominada Zona de Transição (ZT) (TANCREDI, 2010).

De acordo com MEHTA (1994), a zona de transição é o elo fraco em relação à resistência mecânica, e suas características e componentes são determinantes das características no estado endurecido, em relação à resistência mecânica e à durabilidade.

Em compósitos à base de cimento, a maior aderência fibra-matriz se dá pelo desempenho da zona de transição, fazendo com que as duas fases (fibra e matriz) trabalhem em conjunto efetivamente. Com a redução da porosidade e a maior concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) nas proximidades da fibra obtém-se melhor adesão.

Figura 2: Zona de transição do agregado e pasta de cimento.



Fonte: Mehta & Monteiro (2006).

Na argamassa e no concreto há uma formação adicional de poros de grande tamanho comparado com os poros de uma pasta de cimento e estes longos poros estão presentes apenas na interface entre o agregado e a pasta de cimento (WINSLOW; LIU; LAFAYETTE, 1990). Os filmes de água se formam em torno das partículas de agregado no concreto fresco contribuindo com a formação de produtos cristalinos maiores e mais porosos. Na Figura 2, pode ser visualizada uma representação esquemática da zona de transição entre o agregado e a matriz da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

A presença de grandes poros e microfissuras diminuem a resistência do concreto e a resistência das partículas do agregado não chega a desempenhar papel algum na resistência mecânica, já que não se observa transferência de tensões entre a massa da pasta e o agregado (TANCREDI, 2010).

Vale salientar que não basta conhecer apenas o volume total de poros, mas também é necessário conhecer a distribuição dos tamanhos dos poros, assim como a interconectividade entre eles. Um poro isolado não produz efeito maléfico, mas, poros interconectados formam caminhos por onde os agentes agressivos podem percorrer e afetar as propriedades do material (MORETTI, 2018).

2.1.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

2.1.3.1 Trabalhabilidade

Trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário à obtenção de adensamento total. O trabalho interno útil é uma propriedade física inerente dos compósitos cimentícios e é o trabalho ou energia exigido para vencer o atrito interno entre as partículas individuais do concreto (NEVILLE, BROOKS, 2013). Consiste na adequação das somadas dos compostos cimentícios a uma dada aplicação, mantendo sua homogeneidade sem segregar.

No caso das argamassas, é uma das principais propriedades no estado fresco e determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea.

2.1.3.2 Consistência e plasticidade

Consistência é a resistência da forma de uma substância ou a facilidade com que ela flui, muitas vezes tomada como uma medida do grau de umidade, pois dentro de certo limites, concretos com maior quantidade de água são mais trabalháveis que concretos

secos, entretanto, concretos de mesma consistência podem apresentar trabalhabilidade variáveis (NEVILLE, BROOKS, 2013).

No caso das argamassas, a plasticidade é a propriedade pela qual ela tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.

2.1.3.3 Densidade de massa

A densidade de massa, ou massa específica, corresponde à relação entre a massa do material e o seu volume. Denominada como massa específica absoluta quando se desconsidera os vazios existentes, ou massa específica relativa, quando se considera os vazios. Tal propriedade influencia a trabalhabilidade das argamassas, à medida que diminui a densidade, a argamassa torna-se mais leve e com melhor trabalhabilidade, reduzindo o esforço do operário e contribuindo para o aumento da sua produção (PIRES, 2016).

2.1.3.4 Resistência mecânica

Resistência mecânica é a capacidade das matrizes cimentícias de resistirem às tensões de compressão, tração ou cisalhamento. Alguns fatores como, dosagem dos materiais, consumo e natureza dos agregados, relação água/aglomerante, uso de adições e técnicas de execução podem influenciar tal propriedade (PIRES, 2016).

2.1.3.5 Porosidade

Porosidade é a relação entre o volume de espaços vazios (poros) e o volume total do composto cimentício. No desenvolvimento microestrutural das argamassas, uma pequena parcela da água da mistura é combinada quimicamente para formação das fases hidratadas com o cimento, portanto, porosidade total é a soma dos volumes de ar e da água não combinada quimicamente (PIRES, 2016).

2.1.3.6 Durabilidade

Helene, Isaia e Tutikian (2011) conceituam o material concreto como durável quando possui capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico, desgaste por abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, retendo sua forma original, qualidade e capacidade de utilização, quando exposto ao ambiente de trabalho. A durabilidade está diretamente ligada à sua vida útil.

Um dos fatores potenciais na durabilidade do concreto é a idade da estrutura e o ambiente onde a mesma é construída. Para projetos de estruturas de concreto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) especifica os limites da relação a/c (água/cimento) como fator na durabilidade da edificação para as diferentes classes de agressividade.

A água apresenta influência em quase todos os mecanismos de degradação do concreto, geralmente associada aos processos de lixiviação e de deterioração por difusão capilar de gases. Nesses processos ocorre uma diminuição indesejada do pH do concreto, acarretando a despassivação das armaduras, o deslocamento do concreto e a perda da capacidade portante da estrutura. Ao se projetar, busca-se aumentar a resistência à compressão dos concretos e diminuir sua porosidade a fim de obter características de durabilidade semelhantes à de uma rocha.

Outra forma de degradação a ser considerada é a resistência ao fogo. As peças de concreto nem sempre resistem aos danos, provocados pelo fogo, sujeitas a lascamento e perda de aderência com o aço, expondo a estrutura a colapsos parciais e totais, conforme Helene, Isaia e Tutikian (2011).

Nesse contexto, existem três variáveis no estudo do concreto que influenciam no desempenho frente aos agentes agressivos, sendo elas as propriedades mecânicas, a durabilidade e a microestrutura.

As principais propriedades mecânicas das matrizes cimentícias no estado endurecido, como resistência, retração, permeabilidade e fluência, são afetados por outros fatores que não só a composição do cimento (NEVILLE, BROOKS, 2013),

Para Medeiros, Andrade e Helene (2011), durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção, ou seja, é uma propriedade intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto. Uma estrutura pode ter diferentes comportamentos, em suas diversas partes, dependendo da forma como são utilizadas.

O estudo da microestrutura permite caracterizar cada constituinte da massa cimentícia e seu relacionamento com os demais. Desta forma, identificam-se mecanismos responsáveis pela resistência, estabilidade dimensional e durabilidade das misturas, de forma a melhorar as características dos componentes construtivos (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Tais características se aplica às argamassas.

2.1.4 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE MATRIZES CIMENTÍCIAS

Diversos são os fatores envolvidos nos mecanismos de transporte em materiais porosos. Vale salientar que a degradação do material está diretamente relacionada com a facilidade ou dificuldade de transporte das substâncias deletérias em seu interior.

Um dos principais mecanismos de transporte é a absorção capilar. Ocorre imediatamente após o contato superficial do líquido com o substrato devido às tensões capilares. Nos materiais hidrófilos, os líquidos são atraídos para o interior do poro, ocorrendo a ascensão do líquido através do material (MORETTI, 2018).

A viscosidade, a densidade e a tensão superficial do líquido são parâmetros fundamentais nesse tipo de transporte, enquanto que as variáveis intrínsecas ao sistema são o teor de umidade e como os poros estão conectados.

Quanto menor a dimensão do poro, maior o valor da pressão capilar. A porosidade das matrizes cimentícias é composta por um sistema complexo com poros de diferentes dimensões e tortuosidades, e desta forma, não é possível analisar os poros de maneira individualizada. No entanto, é possível analisar o comportamento global do material por meio do coeficiente de absorção capilar (MORETTI, 2018).

2.2 ADIÇÕES MINERAIS

A NBR 11172 (ABNT, 1990) define adições como “Produto de origem mineral adicionados aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características”. As adições podem melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco, a resistência e a durabilidade.

Considerando que os materiais constituintes do concreto são elementos não-renováveis, as adições têm se mostrado uma alternativa viável e eficiente para a substituição parcial desses elementos e no tocante à diminuição do impacto ambiental, visto que grande parte dessas adições é formada por resíduos agroindustriais. Assim, consegue-se, concomitantemente, a redução de um passivo ambiental e o ganho econômico da incorporação desses resíduos nos compostos cimentícios.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são materiais que apresentam atividade pozolânica ou propriedades cimentantes que adicionados às argamassas ou aos concretos melhoram suas propriedades reológicas.

As adições minerais, em sua maioria, são derivadas de resíduos que normalmente seriam descartados inadequadamente, ocasionando riscos ao meio ambiente. De acordo

com Dal Molin (2011), a incorporação desses produtos melhora as características técnicas das matrizes cimentícias. Para Siqueira et al. (2012), dependendo da composição química e distribuição do tamanho das partículas, vários resíduos agroindustriais podem ser usados em argamassas, seja em substituição parcial ao cimento ou ao agregado miúdo.

2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ADIÇÕES

A NBR 11172 (ABNT, 1990) classifica as adições quanto a sua ação físico-química em três tipos: pozolânicas, cimentantes e inertes/fíler.

2.2.1.1 Materiais Pozolânicos

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define como material pozolânico, o material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, quando finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades cimentantes, sendo subdivididas em pozolanas naturais e artificiais.

As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (mais de 65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica.

As pozolanas artificiais são materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividades pozolânica, entre as quais tem-se argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais não tradicionais como escórias siderúrgicas, cinzas de resíduos vegetais e resíduos de carvão mineral.

A eficiência das adições minerais está diretamente relacionada com a composição química, ao grau de amorficidade, à granulometria e a quantidade utilizada (MATOS; GUIMARÃES, 2017). Para avaliar a pozolanicidade de um material, faz-se necessário o uso de métodos químicos e/ou físico-mecânicos. Dentre eles, os mais adotados para avaliar a pozolanicidade de resíduos agroindustriais são (RODRIGUES; BERALDO, 2010):

- *Análise química*: análise realizada principalmente pela espectroscopia de fluorescência de raios-X. O silício deve ser o elemento predominante e o teor de carbono não deve ultrapassar 18%.

- *Finura*: é importante caracterizar a finura do material, pois os finos tendem a preencher os vazios, apresentando o efeito secundário de fíler. A análise granulométrica a

laser, ou a fração retida na peneira de #200 (abertura de malha 0,075 mm), são alguns métodos utilizados.

- *Determinação material vítreo*: a avaliação do material em amorfo ou cristalino é realizada pela difração de raios-X. Quanto mais cristalino for o material, menor será sua reatividade.

- *Resistência mecânica*: a NBR 5752 (2014) refere-se ao ensaio da mistura com o cimento Portland. A eficiência do material como pozolana é avaliada efetuando-se a comparação entre a argamassa confeccionada apenas com cimento e aquela produzida tendo parte do cimento substituído pelo material.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) ainda apresenta a classificação geral para os materiais pozolânicos condicionada à conformidade de exigências químicas e físicas em naturais e artificiais (N), cinzas volantes (C) e (E) para as pozolanas que diferem das anteriores, conforme apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Exigências químicas e físicas dos materiais pozolânicos.

| Propriedades | Classes de Material Pozolânico | | |
|---|--------------------------------|-------|-------|
| | N | C | E |
| Exigências Químicas | | | |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín. | ≥ 70 | ≥ 70 | ≥ 50 |
| SO ₃ , %máx | ≤ 4 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| teor de umidade, % máx. | ≤ 3 | ≤ 3 | ≤ 3 |
| perda ao fogo, % máx. | ≤ 10 | ≤ 6 | ≤ 6 |
| álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx. | ≤ 1,5 | ≤ 1,5 | ≤ 1,5 |
| Exigências Físicas | | | |
| material retido na peneira 45 µm, % máx. | < 20 | < 20 | < 20 |
| Índice de atividade pozolânica: | | | |
| * com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín. | ≥ 90 | ≥ 90 | ≥ 90 |
| * com a cal aos 7 dias, em MPa | ≥ 6 | ≥ 6 | ≥ 6 |
| * água requerida, % máx. | 115 | 110 | 105 |

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tashima (2006) critica a norma quanto ao fato da mesma não apresentar pozolanas altamente reativas como a sílica ativa e o metacaulim. Para Cordeiro (2009), uma vez que a atividade pozolânica está influenciada pelo teor de SiO₂ e/ou Al₂O₃ amorfos, é incoerente fixar um limite de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ que não contemple a forma do arranjo estrutural, ou cristalino amorfo.

A melhoria das propriedades do concreto proporcionada pela incorporação de adições minerais pode ser atribuída à formação de maior quantidade de C-S-H gel no concreto, devido à reação da sílica presente no seu conteúdo e os íons Ca²⁺, OH⁻ ou o CH produzido pela hidratação do cimento Portland (PRAMADA, 2005).

Na hidratação do cimento Portland são gerados compostos de silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio. O hidróxido de cálcio em presença da pozolana produz uma reação pozolânica, formando silicato de cálcio hidratado semelhante ao formado na reação primária, que é o maior responsável pela resistência da pasta.

Devido à finura que os materiais pozolânicos apresentam, há também um efeito físico gerado pelo preenchimento dos espaços vazios deixados durante a hidratação do cimento com diminuição da capilaridade, proporcionando uma maior densificação e continuidade da pasta de cimento e, por sua vez, do concreto ou argamassa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.2.1.2 Materiais Cimentantes

Os materiais que apresentam atividade cimentante são denominados como materiais hidráulicos que reagem na presença de água formando compostos resistentes. Segundo Dal Molin (2011), Matos e Guimarães (2017), não necessitam de hidróxido de cálcio presente no cimento para formar produtos como CSH, entretanto, a quantidade de produtos cimentantes deve ser corretamente dimensionada para aplicação de materiais com fins estruturais.

2.2.1.3 Fillers

Quanto aos *fillers*, são materiais finos, com finura semelhante ou inferior à do cimento Portland, e que devido as suas propriedades físicas, tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, tais como trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência à fissuração. Geralmente são componentes inertes e não devem aumentar a demanda de água da mistura quando usados em concreto, podendo ativar a hidratação do cimento como pontos de nucleação (NEVILLE, 1997). Sua ação é puramente física e não possui nenhuma atividade química, em relação à produção de C-S-H (MATOS; GUIMARÃES, 2017).

2.3 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

O uso de materiais suplementares em concretos e argamassas de cimento Portland vem se tornando crescente devido aos danos ambientais que a produção de cimento e a extração de agregados naturais causam ao meio ambiente (BORTOLETTO et al., 2017).

Devido aos impactos ambientais provocados especificamente por suas atividades, a indústria da construção civil apresenta-se como o maior consumidor individual de recursos

naturais. Estima-se que esse setor consuma entre 20% e 50% do total de recursos naturais. Por outro lado, o setor já se apresenta como um grande incorporador de alguns resíduos de outras indústrias, tais como a cinza volante e a sílica ativa (LIMA; ROSSIGNOLO, 2009).

A biomassa é um combustível renovável capaz de reduzir emissões de CO₂ e enxofre. No Brasil, os altos índices de utilização da biomassa estão relacionados à diversidade climática e à abundância de recursos agroflorestais, pois é o maior produtor e consumidor mundial da “bioenergia” (CAMPOS, 2008).

O aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos é um tema que tem assumido grande relevância em virtude das enormes quantidades geradas (MARTINS et al., 2007). Os subprodutos de origem florestal, notadamente, os subprodutos agroindustriais são estudados visando seu aproveitamento como adições minerais em matrizes cimentícias (LIMA; ROSSIGNOLO, 2010).

Os processos realizados nas indústrias e agroindústrias para atender as especificações do produto e do mercado, faz com que aumente o volume de materiais descartados durante o processo de produtivo. Diante disso, vários estudos visam identificar a viabilidade em transformar os resíduos gerados em fonte de matéria-prima para novos produtos ou fonte de energia para outras indústrias.

A potencial utilização de resíduos agroindustriais na obtenção de novos materiais para a construção civil se deve a necessidade de redução do custo da construção; a elevada quantidade de matéria-prima de recursos naturais que é consumida e à preocupação com o esgotamento dessas reservas naturais (LIMA; ROSSIGNOLO, 2010).

No Quadro 1 pode ser observado o potencial de reaproveitamento de vários tipos de resíduos na construção civil pela apresentação da síntese das pesquisas e dos estudos identificados aplicando subprodutos agroindustriais em compósitos cimentícios.

Quadro 1: Panorama das pesquisas identificadas para reaproveitamento de resíduos agroindustriais em compósitos cimentícios.

| Referências | Tipos de resíduos | Aplicações |
|---|--|--|
| 1. Lima; Rossignolo (2009) | Cinzas da casca da castanha de caju | Substituto parcial do cimento Portland em matrizes cimentícias |
| 2. Repette (2011) | Cinza leve e cinza pesada de carvão mineral | Emprego em concretos autoadensáveis |
| 3. Sua-lam; Makul (2013) | Palhas de arroz não tratada e cinzas originadas de combustível pulverizado | Misturas para fabricação de concreto auto adensável |
| 4. Venkatanarayanan; Rangaraju (2014) | Cinzas de palhas de arroz de baixo carbono | Argamassas de cimento Portland |
| 5. Pacheco-Torgal, Jalali (2010) 6. Sellami, Merzoud, Amziane (2013) | Fibras vegetais | Incorporação ao concreto |

Quadro 1: Panorama das pesquisas identificadas para reaproveitamento de resíduos em compósitos cimentícios (continuação).

| Referências | Tipos de resíduos | Aplicações |
|--|---|--|
| 7. Ban; Ramli (2011) | Cinza de madeira e sílica ativa densificada | Substituto parcial do cimento Portland em argamassas |
| 8. Ramos; Matos; Souza-Coutinho (2014) | Pó de cortiça | Substituto parcial do cimento Portland em compósitos cimentícios |
| 9. Beline et al. (2015) | Carvão vegetal, argila expandida e EPS | Substituição ao agregado graúdo em concretos |
| 10.Santos; Tubino; Schneider (2015) | Resíduos de carvão mineral | Substituição ao agregado miúdo na produção de blocos de pavimentação de concreto |
| 11.Dhengare et al. (2015) 12.Reddy et al. (2015) | Resíduos de bagaço de cana | Substituição ao cimento Portland na produção de concreto de alta resistência |
| 13.Ramos (2015) | Resíduos de carvão vegetal | Utilização com agregado leve em argamassas |
| 14.Subramaniam; Subasinghe; Fonseka (2015) 15.Chowdhury; Mishra; Suganya (2015) 16.Batt e Garg (2017) 17.Ottosen et al. (2016) 18.Ukrainczyk; Koenders; Stirmer (2017) | Cinza de madeira | Substituto parcial do cimento Portland em concretos |
| 19.Yang; Huddleston; Brown (2016) 20.Skripkiūnas et al. (2017) | Cinza de madeira | Substituição parcial do cimento ou areia em concretos convencionais, concretos compactados e de preenchimento |
| 21.Mota et al. (2017) | Carvão ativado residual | Substituição parcial dos agregados em concretos convencionais |
| 22.Elias; Soares; Souza (2017) | Cinza pesada moída | Emprego como material impermeabilizante em obras ambientais, como camada de fundo de depósitos de resíduos (<i>liners</i>) |
| 23.Lima; Sales; Almeida; Moretti; Portella (2011) | Cinza do bagaço da cana-de-açúcar | Utilização como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana |

Fonte: Próprio Autor (2019)

Dos 23 trabalhos identificados no Quadro 1, somente 3 trabalham com resíduos de carvão vegetal - Beline et al. (2015), Ramos (2015) e Mota et al. (2017). Isso demonstra a necessidade de se estudar mais este tipo de resíduos e buscar conhecimento para propor o seu uso tecnológico como adição.

Os resíduos agroindustriais utilizados nesse estudo em desenvolvimento são derivados do beneficiamento do carvão vegetal. O carvão vegetal pode ser definido como um material combustível constituído de determinados vegetais, bem como de tecidos lenhosos, celulose, esporos, resinas, ceras, algas, betumes, hidrocarbonetos, etc., ou seja, de material heterogêneo. Fatores como a pressão e a temperatura, determinam a

carbonização gradativa da matéria original, que sofreu modificações significativas e enriquecimento em carbono (VELHO, 2018).

Segundo Brito e Barrichelo (1981), de acordo com as técnicas de carbonização para obtenção e o uso do carvão vegetal ao qual é destinado, pode-se obter carvões muito diferentes.

2.4 O CARVÃO VEGETAL

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal, contribuindo com cerca de 30% de todo o carvão produzido no mundo. A produção de carvão vegetal para fins siderúrgicos é o segundo maior setor de base florestal do país, detendo 25,6% da área total reflorestada (SILVA et al., 2014).

A produção de carvão vegetal é uma fonte de renda importante para agricultores familiares, como apontam Souza et al. (2014). Apesar de sua importância econômica e social, a dimensão da produção é subestimada pelas estatísticas oficiais. A falta de dados reais sobre o carvão vegetal está relacionada à falta de licenciamento ambiental.

O carvão vegetal tem posição de destaque na economia brasileira e, principalmente, na economia do Estado de Minas Gerais, uma vez que o seu consumo representa 66,7% do total de carvão vegetal consumido no país (BOTREL et al, 2007, apud ARRUDA et al., 2011).

Um dos problemas associados à produção de carvão vegetal no Brasil diz respeito à origem da matéria-prima. Cerca de 50% da matéria-prima destinada à produção de carvão vegetal é oriunda de matas nativas. Historicamente, a disponibilidade de material lenhoso proveniente de florestas nativas permitiu o desenvolvimento da siderurgia a carvão vegetal. O aumento nas exportações de commodities provocou acréscimo da produção, com consequente desmatamento, seja com recursos do produtor ou com programas de financiamento de Governo, que concedeu condições para fornecimento de madeira designadas à produção de carvão vegetal (DUBOC et al., 2007).

No período de 1980 a 2005, o consumo de carvão originário de florestas plantadas aumentou de 14,1% de MDC (Metro de Carvão, quantidade de carvão contida em um metro cúbico) para 50,4% MDC no Brasil. A fim de controlar o crescimento da exploração de florestas, foi regulamentado pelo Código Florestal Brasileiro, o Decreto 97.628/89, que obriga o consumidor a manter suas próprias florestas para consumo anual de carvão vegetal superiores a 12 mil estéreos (DUBOC et al., 2007).

O carvão vegetal é uma fonte de carbono capaz de regeneração, tornando-se, por sua vez, um combustível metalúrgico de grande importância no país (SILVA et al., 2016).

Outro problema envolvido com o carvão vegetal diz respeito à tecnologia empregada na sua produção. Produzido em sua maioria da mesma forma como era há um século, não há controle qualitativo e quantitativo da produção, o que resulta em baixa eficiência ao sistema (DUBOC et al., 2007).

Para que a produção deste combustível seja considerada como uma atividade sustentável, deve seguir parâmetros de replantio ordenado, a transformação da madeira em carvão deve acontecer em fornos apropriados de forma a obter um melhor rendimento por área plantada, e ainda deve-se utilizar a recuperação de subprodutos.

Por se tratar de um material muito friável, ou seja, passível de sofrer fragmentação ou esfacelamento durante sua manipulação o mesmo gera perdas consideráveis. Dados de Silva et al. (2016) mencionam que desde a obtenção do carvão vegetal nas carvoarias até sua efetiva utilização, é gerado um índice de inutilização do produto de cerca de 25% deste combustível com uma granulometria abaixo de 9 mm, ou seja, finos de carvão. Esses são entendidos como resíduos, conforme será apresentado a seguir.

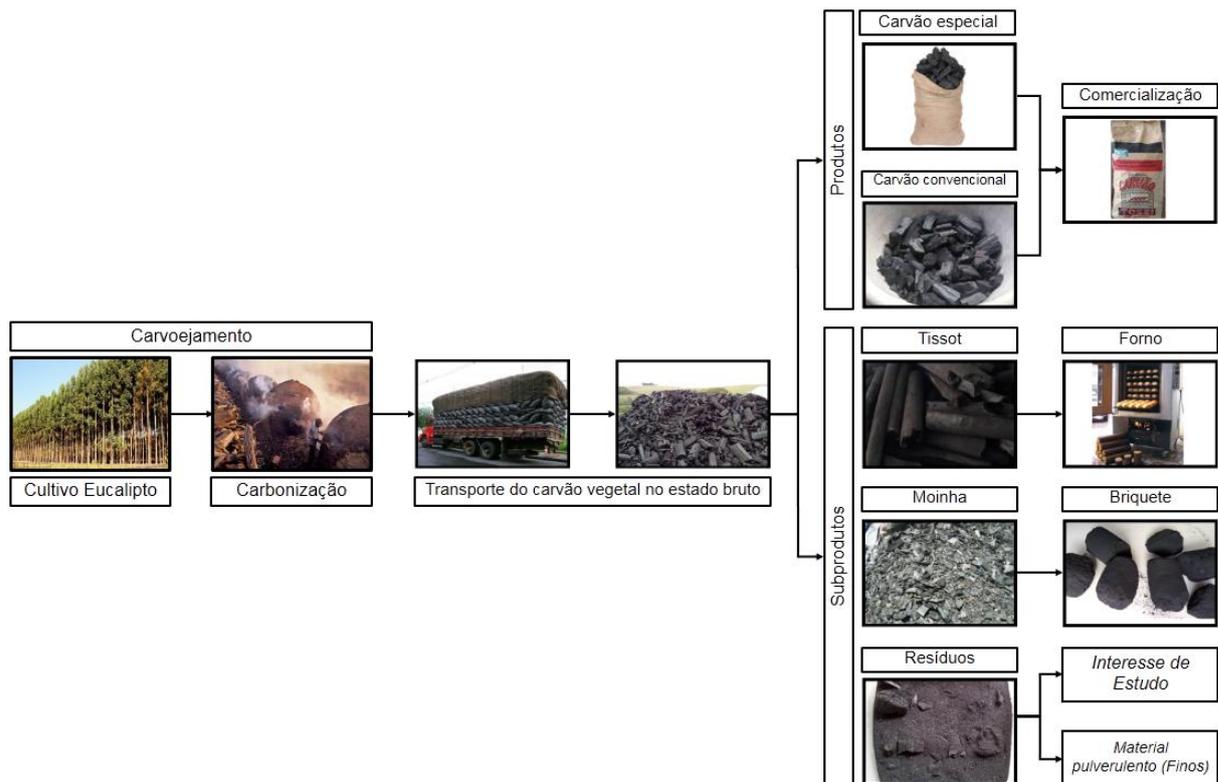
2.4.1 TERMINOLOGIA ASSOCIADA AO CARVÃO VEGETAL

A material prima do carvão vegetal é a madeira. Nesse trabalho, o processo primário de produção teve como origem o cultivo de eucalipto.

O processo secundário consiste no enforamento da madeira, fechamento e vedação das portas dos fornos e início da ignição. A carbonização da madeira de eucalipto ocorre, geralmente, em fornos de alvenaria que são de baixo custo e de fácil construção. Porém, suas paredes são más condutoras de calor, ocasionando que sejam gastos vários dias para o resfriamento dos fornos, diminuindo a produtividade. Além disso, o processo, em geral, é bastante heterogêneo, a cada fornada, têm-se carvões com qualidade variável e diferentes rendimentos gravimétricos.

A Figura 3 apresenta um fluxo geral do processo, considerando desde a extração da madeira, a pirólise e transporte do carvão vegetal no estado bruto até a comercialização dos produtos, incluindo a identificação deles e de seus subprodutos.

Figura 3: Fluxo geral do processo de obtenção do carvão vegetal.



Fonte: Própria Autora (2019).

Considerando que alguns processos e subprodutos possuem diferentes nomenclaturas em função da regionalidade brasileira, segue-se a definição dos termos utilizados nesse estudo.

Briquetes: é um bloco denso e compacto de materiais energéticos, geralmente feitos a partir de resíduos da carbonização da madeira. Conhecido também como lenha ecológica, o briquete é capaz de substituir com eficiência o gás, a energia elétrica, o carvão vegetal, o carvão mineral, a lenha e outros tipos de combustíveis.

Carbonização: é um processo químico de combustão incompleta de determinados sólidos quando submetidos ao calor elevado. Pela ação do calor, a carbonização remove hidrogênio e oxigênio do sólido, de modo que o material restante é composto principalmente de carbono.

Carvoejamento: definição do ato ou processo de fabricação de carvão.

Coqueria: é um estabelecimento industrial, geralmente de fornos, onde é produzido o coque (carvão).

Finos de carvão vegetal: são todos os particulados de carvão vegetal com granulometria inferior a 9,52 mm, extraídos do processo de preparação de carga do alto

forno. Os finos são um coproduto indesejado originado da pirólise da madeira e do manuseio mecânico do carvão vegetal.

Metro estéreo (st): trata-se de uma pilha de madeira com 1 metro de comprimento, 1 metro de largura e 1 m de altura com espaços vazios entre as peças, ou seja, elas não se encaixam precisamente.

MDC: denominado com metro de carvão é a unidade de volume de carvão usual para comercialização no Brasil, significando metro cúbico de carvão a granel. Tal nomeação derivou da necessidade do fato de que os produtores artesanais de carvão tinham o hábito de molhar o mesmo para aumentar seu peso, quando a comercialização se dava pelo peso. Tal procedimento é um retrocesso tecnológico, pois não permite quantificar e otimizar a qualidade do carvão.

Moinha: são fragmentos de carvão vegetal que ficam na eira após o fracionamento dos produtos para comercialização.

Pirólise: é uma reação de alteração ou decomposição que ocorre pela ação de altas temperaturas. Ocorre uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio.

Rejeito: é um tipo específico de resíduo sólido quando todas as possibilidades de reaproveitamento ou reciclagem já foram esgotadas e não há solução final para o item ou parte dele.

Resíduo: qualquer substância ou objeto de que o ser humano pretende desfazer-se por não lhe reconhecer utilidade. A produção de resíduos é causadora de poluição e tem aumentado com o desenvolvimento socioeconômico e tecnológico da sociedade.

Tissot: são fragmentos de madeira que não foram carbonizados de acordo com os requisitos de comercialização, mas ainda podem ser utilizados como lenha.

2.4.2 IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

Os segmentos que mais contribuem para as emissões na indústria são a siderurgia (produção de ferro-gusa e aço), a produção de cimento e a indústria química. Juntos esses setores representaram 59% das emissões associadas à atividade industrial em 2016, ou 95,8 MtCO₂ (queima de combustíveis e processos industriais somados) (RITTL, 2018).

A cadeia produtiva da construção civil tem um grande peso em termos de emissões de carbono. Em consonância com esta tendência, foi lançado, na CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), o Guia Metodológico para Inventário de Emissões de

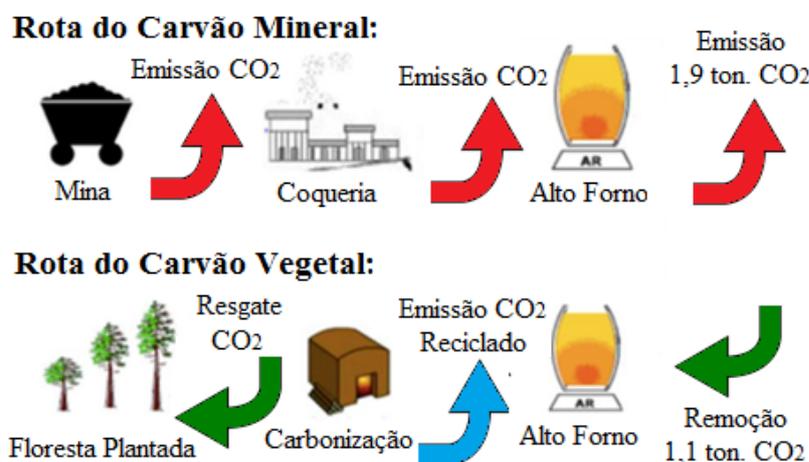
Gases de Efeito Estufa na Construção Civil – Setor Edificações. O foco principal está na redução do consumo de recursos naturais e conseqüentemente, redução dos impactos ambientais (GREEN DOMUS, 2017).

Visando a redução de emissões de gases poluentes, os países que ratificaram ao Protocolo de Kyoto assumiram medidas de mitigação das emissões de CH₄, resultante da produção de carvão vegetal por meio de implementação de projetos de compensação, pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Tais melhorias têm valorizado as emissões produzidas durante o processo de pirólise da biomassa, no sentido de seu aproveitamento para geração de energia adicional, melhorando a eficiência econômica e ambiental da produção de carvão vegetal (DUBOC et al., 2007; SANTOS et al., 2012).

Neste cenário, apesar da produção de carvão vegetal ser o segundo maior emissor de CO₂ no setor industrial de ferro-gusa e aço, quando produzido a partir de biomassa plantada (silvicultura) ou de áreas nativas com reposição florestal (áreas de manejo) possui balanço de emissões de CO₂ quase nulo (LAIRD, 2008; NORGATE, LANGBERG, 2009; WATTS, PORTER, 1997; UHLIG, GOLDEMBERG, COELHO, 2008), já que este composto foi previamente absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível. Portanto, o balanço em termos de GEE é favorável ao uso do carvão vegetal.

Na Figura 4 são apresentadas as rotas de produção de gusa a partir do carvão mineral e vegetal, além das emissões e remoções de dióxido de carbono em cada rota. A substituição do carvão mineral pelo carvão vegetal possibilita um ganho ambiental de três toneladas de dióxido de carbono equivalente por tonelada de gusa produzida (SILVA et al., 2016).

Figura 4: Comparativo de rotas do carvão



Fonte: Moura, 2006.

Ambientalmente o carvão vegetal leva grande vantagem em relação ao carvão mineral uma vez que é proveniente de uma fonte renovável. Apesar dos atuais processos de

carbonização não serem isentos de poluição, dentre as vantagens das plantações florestais, destaca-se a possibilidade de remoção de CO₂ da atmosfera (1,8t CO₂/t madeira seca), liberação de O₂ para atmosfera (1,3t O₂/t madeira seca), além da retenção e aumento do estoque de carbono (20 kg CO₂/árvore ano) (SILVA et al., 2016).

Por se tratar de uma tecnologia primitiva, o processo descarta, pela emissão de gases, milhares de componentes químicos, aproveitando-se de 30% a 40% da madeira na forma de carvão vegetal. O restante é simplesmente lançado na atmosfera na forma de gases (DUBOC et al., 2007). O resultado global das emissões de gases é importante, tanto em relação à perda de produtos químicos valiosos, que poderiam ser economicamente recuperados, quanto aos aspectos ambientais.

Estima-se que em 2005 foram desmatados ilegalmente 245 mil hectares e emitidas 72 milhões de toneladas de gás carbônico devido ao uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica (UHLIG, GOLDEMBERG, COELHO, 2008).

No aspecto social, no decorrer do processo de beneficiamento do carvão vegetal os trabalhadores encontram-se com o corpo coberto pela fuligem e deles, muitas vezes, somente se veem os olhos (SANTOS et al., 2012). Todo funcionário que trabalha em uma função com riscos tem o direito de usar Equipamentos de Proteção Individual (EPI), entretanto, apesar de serem fornecidos pelas carvoarias, existe uma recusa por parte dos trabalhadores, justificada pela dificuldade de execução das atividades com a utilização dos EPI's.

No plantio e cultivo de eucalipto, os trabalhadores ficam suscetíveis pelo uso indiscriminado de agrotóxicos, já no processo de abastecimento do forno com a matéria-prima, assumem posturas penosas. A retirada do carvão é a fase mais crítica no que se refere à exposição às altas temperaturas e aos gases originados na combustão da madeira, além dos riscos de acidentes (ZONA DE RISCO, 2012).

Nas situações analisadas, está presente a fumaça e os gases de combustão que podem provocar lesões das vias aéreas e intoxicação. A realidade é complexa e convoca métodos a fim de melhorar as condições de trabalho pela mecanização das fases mais agressivas, protegendo os trabalhadores.

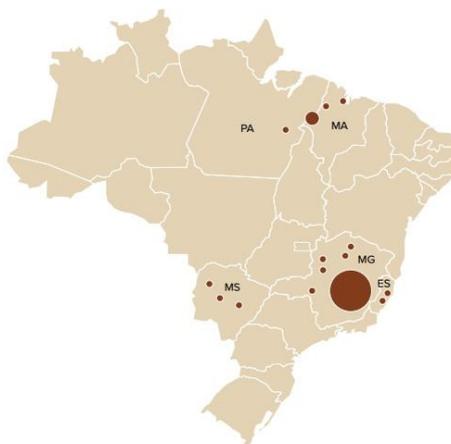
2.4.3 CONTEXTO ECONÔMICO DO CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal contribui significativamente para o desenvolvimento das indústrias de base florestal no Brasil. Os produtores se orientam, geralmente, pelo mercado de carvão vegetal para siderurgia. A instabilidade da atividade se deve às condições edafoclimáticas

ocasionadas por flutuações estacionais e aleatórias, no decorrer do ano, o que resulta em um desajustamento entre oferta, demanda e preço (CASTRO et al, 2007).

No Brasil, existem mais de 120 indústrias siderúrgicas que utilizam carvão vegetal em seu processo produtivo. Os principais polos consumidores se concentram no estado de Minas Gerais (Figura 5), entretanto, vários produtores de ferro-gusa e de ferro-liga à base de carvão vegetal encerraram suas atividades em 2016 (IBÁ, 2017).

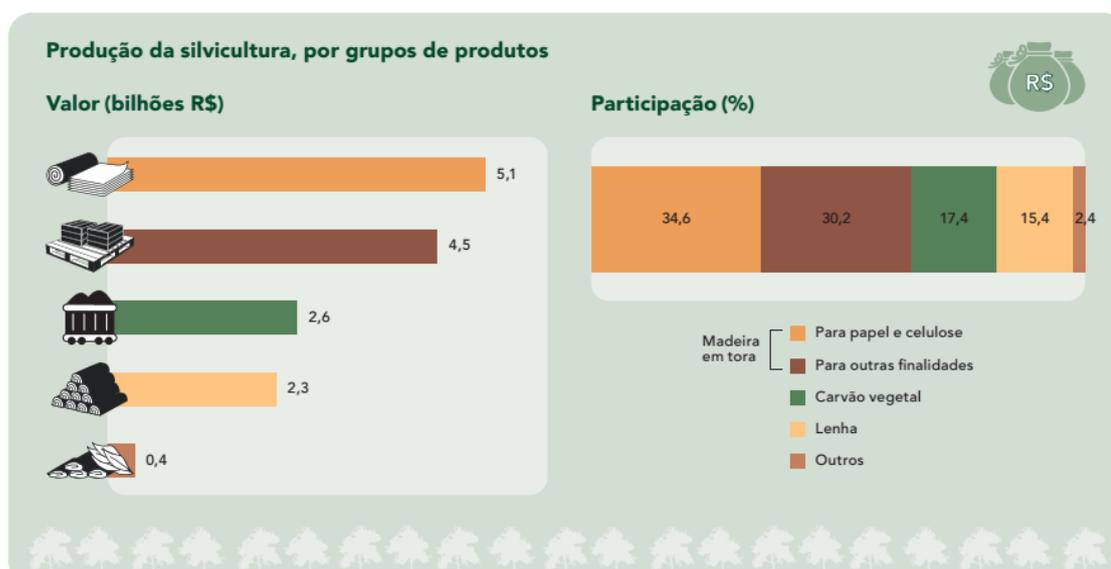
Figura 5: Principais polos de consumo de carvão vegetal no Brasil.



Fonte: IBÁ (2017).

O setor de madeira para produção de carvão vegetal e lenha, apresentou recuperação após dois anos de queda. O volume de carvão vegetal produzido em 2017 registrou aumento de 4,2% no seu valor de produção, alcançando R\$ 2,6 bilhões, conforme Figura 6 (IBGE, PEVS, 2017).

Figura 6: Produção da silvicultura, por grupos de produtos.



Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, PEVS (2017).

O Estado de Minas Gerais segue como destaque na produção de carvão vegetal no País, apresentando em 2017 valores de produção de R\$ 2,1 bilhões, crescimento de 7,4% (IBGE, PEVS, 2017). O tipo de informação de mercado utilizada é o preço praticado na compra de carvão nas regiões consumidoras desse insumo (CASTRO et al., 2007).

Na geração de energia elétrica, o carvão “vapor”, predominantemente dos estados Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, diminuiu sua demanda em 4,7% em 2016 em relação ao ano anterior. No caso do carvão mineral, registrou-se uma leve alta de 0,2% no setor siderúrgico, mais precisamente, processados em coquearias (MME, 2017).

De acordo com Rezende et al. (2006), a viabilidade econômica do carvão vegetal é significativamente afetada pelo custo de carvoejamento, principalmente quando o carvão está no limite inferior de remuneração esperada.

2.5 PROCESSO E PRODUÇÃO DO CARVÃO VEGETAL

A produção do carvão vegetal é realizada em carvoarias, onde são executadas as atividades produtivas desde o recebimento da madeira até o despacho do carvão. Todavia, no Brasil, a maior parte de sua produção ainda se restringe aos fornos tradicionais, construídos há muito tempo, apresentando problemas ambientais e sociais, por envolverem atividades insalubres e de baixo nível de capacitação técnica (SILVA et al., 2014).

O carvão vegetal é um subproduto florestal resultante da pirólise da madeira, também denominada como carbonização ou destilação seca da madeira. O aquecimento da madeira é realizado a temperaturas superiores a 300°C, em ambiente fechado com atmosfera pobre em oxigênio (DUBOC et al., 2007) (CASTRO et al., 2007).

O termo “pirólise” é utilizado para caracterizar a decomposição térmica de materiais contendo carbono, na ausência de oxigênio. Assim os resíduos agrícolas ou outro tipo qualquer de material orgânico se decompõem se em três fases: sólida (carvão vegetal), gasosa (não condensável) e líquida (fração pirolenhosa) (DUBOC et al., 2007).

O processo de beneficiamento do carvão vegetal pode ser dividido basicamente em sete etapas. Inicialmente procede-se o cultivo e plantio de vegetal de tronco lenhoso, como o eucalipto, seguido do corte e transporte da madeira. Cortada a madeira, ela é “lerada”, ou seja, os galhos são separados dos troncos roliços e dispostos para secar (ZONA DE RISCO, 2012).

Após um intervalo de 15 a 30 dias, a lenha é transportadas até próximo ao forno e empilhadas para o abastecimento do mesmo. De modo geral, a qualidade do carvão a ser obtido depende da espécie e tamanho da madeira e do método de carbonização. Em linhas

gerais, pode-se dizer que a densidade da madeira influi na densidade do carvão. Em relação ao tamanho, pedaços pequenos da madeira produzem carvão mais duro e mais denso. A temperatura de carbonização influencia no peso por metro cúbico (MDC) e no teor de carbono fixo do carvão obtido, segundo DUBOC et al. (2007)

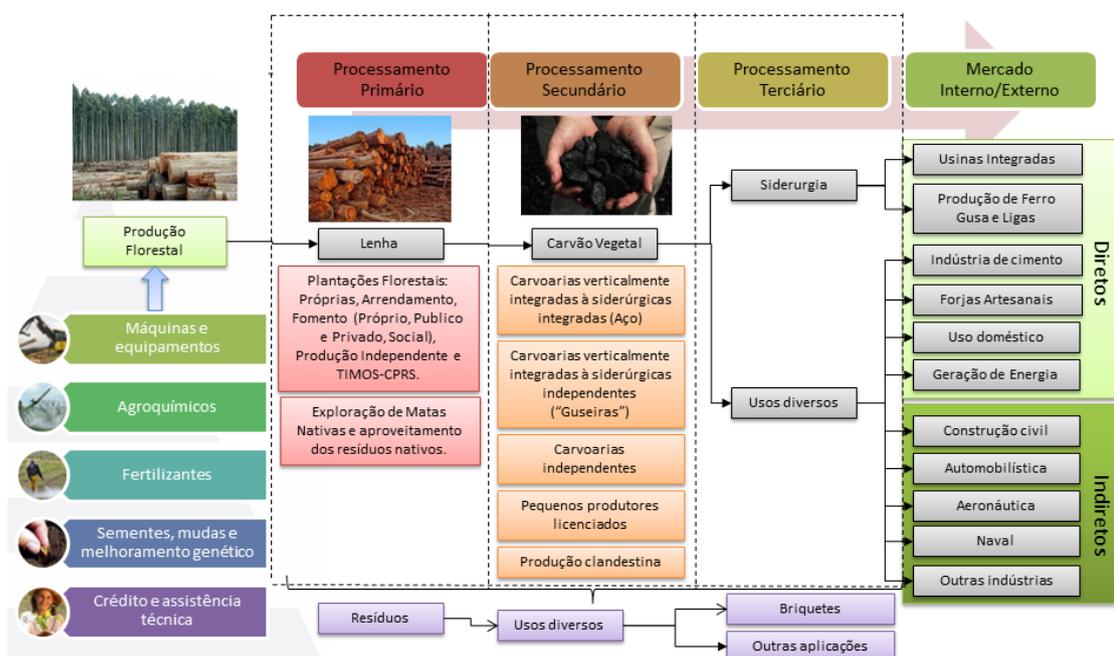
Durante o processo de carbonização, cerca de três dias, o carbonizador supervisiona a entrada de oxigênio, é importante ressaltar que a definição dada ao processo de pirólise exclui a presença de oxigênio, porém, na prática, alguns processos são conduzidos com alimentação de ar (DUBOC et al., 2007). O indício de conclusão de cozimento da madeira é verificado pela presença de fumaça na cor azul, fazendo vistas ao superaquecimento, capaz de provocar a perda do produto. O responsável por extinguir o fogo, com o lançamento da barrela para impedir a entrada de ar através de pequenas aberturas é o barrelador (ZONA DE RISCO, 2012).

Interrompida a combustão, aguarda-se o resfriamento do forno para proceder a abertura da parede, transfere-se o carvão da parte interna para a “grade”, artefato metálico fabricado com um trançar de arames, e posteriormente para o solo (ZONA DE RISCO, 2012).

Dependendo do ponto de cozimento do carvão, os trabalhadores lançam água sobre ele para acelerar o processo de resfriamento. O carvão resfriado é ensacado e colocado no caminhão para ser transportado e comercializado.

Na Figura 7 é apresentado um esquema do processo de beneficiamento do carvão vegetal desde a matéria-prima até a sua comercialização efetiva.

Figura 7: Processo do beneficiamento do carvão vegetal e comercialização.



Fonte: STABH (2018).

A geração de finos ocorre nos vários estágios de produção e entrega do carvão vegetal na usina e pode ser influenciada fortemente desde o início do processo (retratado na Figura 8). A manipulação do carvão na descarga do forno, peneiramento e, posteriormente na carga das carretas para a usina e ainda no transporte do carvão, o tempo de deslocamento também influencia na geração dos finos de carvão vegetal. Por fim, chegando à usina, o processo de descarga por basculamento, o armazenamento nos silos, além dos diversos tombos que o carvão vegetal leva até chegar ao alto forno fecha o ciclo de geração e aumento do percentual de finos (ARCELOR MITTAL, 2019).

A cada 100 ton. de carvão vegetal produzido, são gerados cerca de 30 ton. de finos, o que representa uma grande perda, não só econômica, mas também ambiental (ARCELOR MITTAL, 2019).

Figura 8: Relação de finos gerados por carvão vegetal produzido.



Fonte: Arcelor Mittal (2019).

2.5.1 VARIEDADES DE CARVÃO

No Brasil, os carvões são classificados em dois grupos, os carvões amorfos artificiais e os carvões amorfos naturais (GRUPO TCHÊ QUÍMICA, 2018):

Carvões Amorfos Artificiais: São os produtos resultantes da combustão ou calcinação de diversas substâncias orgânicas. Os principais destes são:

- **CARVÃO VEGETAL:** originado pela carbonização da madeira, é um carvão muito leve, porém com um calor gerado na combustão de 8000 calorias. Uma de suas propriedades mais notáveis é a de absorver gases, o que se efetiva com o desprendimento

de calor. Os derivados durante a produção são os produtos gasosos, o licor pirolenhoso, o alcatrão insolúvel e os gases não condensáveis.

- **CARVÃO NEGRO DE FUMO:** é um carvão leve, muito pulverizado, que é obtido pela combustão incompleta de vários compostos orgânicos, como resinas, alcatrão e acetileno. Emprega-se em pintura e preparo de tintas.

- **CARVÃO DE COQUE:** é um carvão de grande poder calorífico (8000 calorias). Trata-se de um carvão poroso e cinzento. A hulha se coquifica a fim de aumentar sua riqueza em carbono e eliminar princípios de cheiro desagradável ou que corroam os metais das fornalhas, como os gases sulfurosos.

- **CARVÃO METÁLICO:** chamado de carvão de retorta é bom condutor de calor e recebe este nome (carvão metálico) devido ao seu aspecto metálico de cor preta.

No processo de destilação da madeira de eucalipto ainda são formados os produtos condensáveis e os produtos gasosos:

- **PRODUTOS CONDENSÁVEIS:** Tais produtos são representados pela água, seguido pelo ácido acético, álcool metílico, acetona e alcatrões. Os produtos condensáveis se separam por repouso, sendo uma camada inferior formada por alcatrão bruto e uma camada superior aquosa, onde são encontrados o ácido acético, o álcool metílico e acetona. Essa camada é denominada de ácido ou licor pirolenhoso (BRITO; BARRICHELO, 1981).

- **PRODUTOS GASOSOS:** O volume e a composição dos gases não condensáveis bem como os demais produtos da destilação dependem da madeira e da técnica de carbonização empregada. A composição química desses gases constitui-se principalmente de gás carbônico (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), Hidrogênio (H_2), vapores de ácido pirolenhoso, entre outros. Atualmente cresce cada vez mais o interesse pelo aproveitamento industrial dos produtos da destilação da madeira (BRITO; BARRICHELO, 1981).

Carvões Amorfos Naturais: procedem da putrefação de vegetais que, sob camadas de sedimento e fora do contato com o ar, elimina parte de seu carbono (C), já em combinação com o CO_2 , também combinado com o H (CH_4). Seus derivados são (GRUPO TCHÊ QUÍMICA, 2018):

- **CARVÃO ANTRACITA:** é o carvão natural mais antigo, que contém maior proporção de carbono (94%) e um poder calorífico de até 8700 calorias. É empregado como combustível e como redutor dos minérios de ferro nos altos-fornos e, ainda, na calefação de habitações.

- HULHAS OU CARVÃO DE PEDRA: constitui a porção mais importante dos combustíveis industriais pela sua abundância e propriedades. Contem de 75% a 0% de carbono e, ao queimar, desprende em torno de 8000 calorias. Extrai-se dele, por destilação seca, muitos produtos como, por exemplo, o coque, o gás de iluminação, amônia, breu e o alcatrão mineral, que é a matéria-prima do benzeno, naftaleno e anilina. Há duas variedades de Hulha, as ricas em materiais betuminosos e as que possuem pequena quantidade de betumes.

- LINHITO: é o carvão mineral que possui menor quantidade de carbono em relação à Hulha (70%) e com um menor poder calorífico (5000 calorias). É de estrutura compacta e se emprega como combustível e, por destilação seca, origina parafina, gás de iluminação e amônia. O linhito é abundante nos EUA, Alemanha, Áustria, Itália e Espanha.

- TURFO: carvão mineral com menos carbono (55%) e poder calorífico de 3500 calorias. É constituído de resto de plantas (completamente carbonizadas) que costuma ser musgos de estrutura esponjosa. Serve como combustível industrial de escasso valor.

2.5.2 MATÉRIA-PRIMA PARA A PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

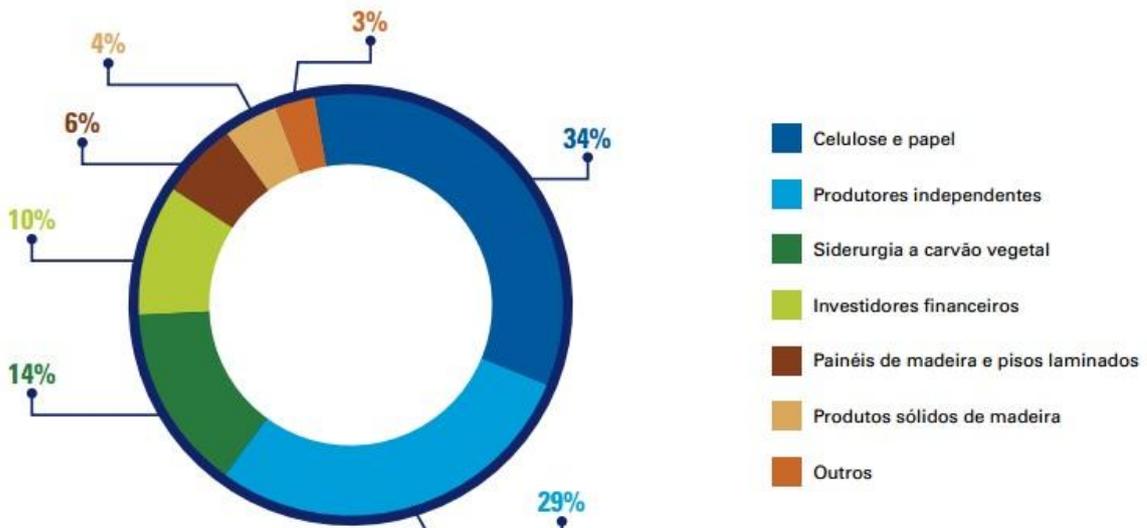
A produção e qualidade do carvão vegetal estão intimamente relacionadas com as características química, anatômicas e físicas da madeira, como o incremento volumétrico da árvore, visto que afetam diretamente a qualidade de massa seca produzida (NONES et al.; 2015).

De acordo com Duboc et al. (2007), nos últimos 20 anos houve um aumento no consumo de carvão originário de florestas plantadas e de origem nativa. O aumento de carvão oriundo da silvicultura manteve-se constante até a primeira década de 1990 e estabilizou-se nos anos subsequentes.

De acordo com o SIDRA (2017), foram produzidas 426.401 toneladas de carvão vegetal na extração vegetal e 4.917.633 toneladas de carvão vegetal na silvicultura no ano de 2017.

No Brasil, do total de árvores plantadas em 2016, 34% pertencem às empresas do segmento de celulose e papel, 29% aos proprietários independentes e pequenos e médios produtores do programa de fomento florestal na comercialização *in natura*, e 14% ao segmento de siderurgia a carvão vegetal (IBÁ, 2017).

Figura 9: Composição da área de árvores plantadas por tipo de proprietários.

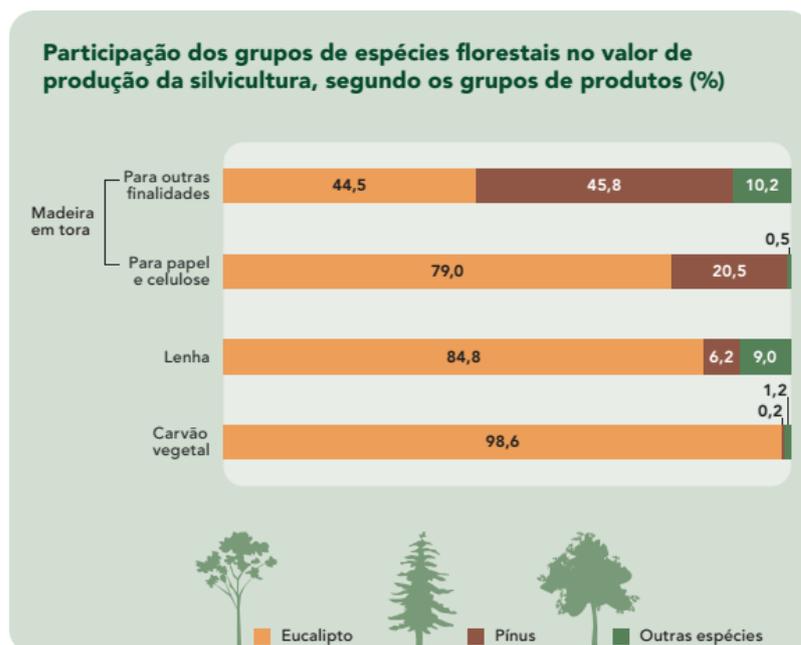


Fonte: Modificado IBÁ (2017).

Das florestas plantadas, destaca-se o cultivo de eucalipto e pínus para fins de produção madeireira, responsáveis por 95,8% da área para fins comerciais. As áreas de eucalipto somam 7,4 milhões de hectares, o que representa 75,2% do total nacional plantado. O Estado de Minas Gerais apresenta a maior área de espécies florestais plantadas do país, com quase 2 milhões de hectares (IBGE, PEVS, 2017).

Conforme mencionado, na produção de carvão vegetal predomina-se o cultivo de Eucalipto como matéria-prima, seguido do Pínus e demais espécies florestais, conforme Figura 10.

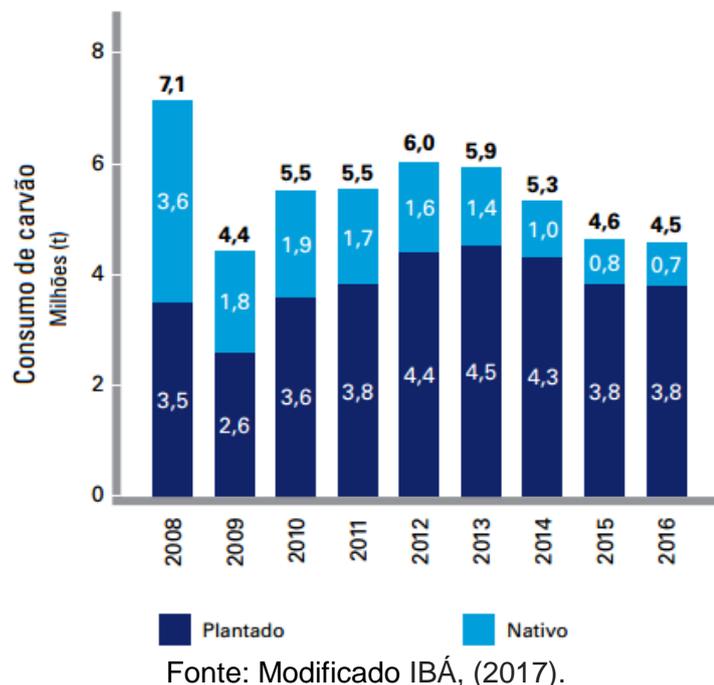
Figura 10: Participação dos grupos de espécies florestais segundo os produtos.



Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, PEVS (2017).

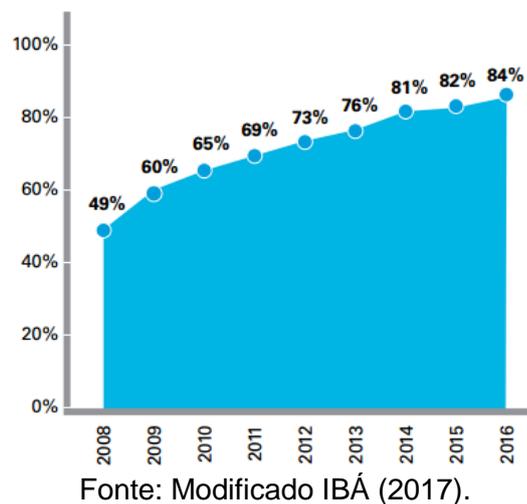
A produção extrativa de madeira apresentou uma retração em virtude da legislação ambiental que estabelece maior rigor e controle em operações de espécies nativas. Aliado a isso, os esforços pelos principais setores consumidores, como o siderúrgico, na substituição de carvão vegetal extrativo pelo de origem em florestas plantadas (IBGE, PEVS, 2017) (IBÁ, 2017). Na Figura 11 é possível verificar o consumo de carvão derivados de florestas nativas e plantadas entre 2008 e 2016.

Figura 11: Consumo nacional de carvão vegetal, 2008-2016.



A madeira oriunda de árvores plantadas foi a matéria prima utilizada em 84% do total de carvão vegetal consumido no Brasil em 2016. Percebe-se uma evolução na participação da madeira plantada na produção de carvão vegetal (Figura 12).

Figura 12: Participação da madeira plantada na produção de carvão, 2008-2016.



No polo siderúrgico de Minas Gerais, desde o século dezenove, o carvão vegetal necessário para a redução do ferro gusa é produzido em florestas plantadas de eucalipto ou importado de outros Estados, em geral de madeira resultante do desmatamento de florestas nativas. No Estado, o carvão vegetal é transportado por distâncias de até 1.000 km (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008).

Existe uma relação direta entre a produção de ferro-gusa e o consumo de carvão vegetal, porém, esta relação não é constante. Isso se deve, possivelmente, às melhorias no processo produtivo, com avanços tecnológicos nos fornos, à redução das perdas e devido à sonegação de informações. De acordo com o diagnóstico realizado sobre o uso do carvão vegetal na produção de ferro-gusa, foi estimada uma diferença de 7,8 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal entre o consumo real e o declarado pelas siderúrgicas no período de 2000 e 2005 (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008).

2.5.3 MÉTODOS DE PRODUÇÃO

Os métodos de produção de carvão vegetal existentes diferenciam-se pela origem de calor no processo de carbonização e pelo reaproveitamento ou não dos subprodutos da pirólise (ANTAL; GRONLI, 2003). De acordo com a fonte de calor, os sistemas de produção de carvão vegetal são classificados em:

- Sistemas com fonte interna de calor ou por combustão parcial: o calor é fornecido por cerca de 10% a 20% do peso da carga de madeira que é destinada para carbonização.

- Sistemas com fonte externa de calor: o calor é fornecido pela queima de combustíveis externos, toda carga de madeira é teoricamente convertida em carvão vegetal, o que resulta no maior rendimento do processo.

Os fornos ainda apresentam certas características que quando combinadas definem sua categoria, tais como:

- Material construtivo: alvenaria, metálico ou híbrido;
- Tipo de mobilidades: móvel ou fixo;
- Forma de exaustão: natural ou forçada.

Os principais sistemas produtivos de carvão vegetal no país são os fornos de alvenaria e os fornos metálicos. Os fornos de alvenaria, comumente chamado de “forno de rabo quente”, possuem viabilidade do baixo custo, construção simples, tamanho reduzido e capacidade de permitir a carbonização com diferentes tamanhos de lenha, entretanto, apresentam baixos rendimentos gravimétricos (GONÇALVES et al. 2010).

Como fornos com sistema de combustão parcial, tradicionais e de larga utilização, podem ser citados: forno de terra, forno de encosta, forno de rabo quente (ou meia laranja) e forno do tipo colmeia ou de superfície (retangulares). Os fornos construídos com material metálico são do tipo container e do tipo cilíndrico metálico vertical (SILVA et al., 2014).

O uso disseminado do carvão vegetal por diversos setores permite o aprimoramento dos processos de produção. Em consonância, os fornos metálicos são aperfeiçoados com o objetivo de alcançar redução do tempo de carbonização, aumento nos rendimentos volumétricos em estéreo de madeira / metro de carvão (st/MDC), aproveitamento dos subprodutos do processo, diminuição dos custos logísticos, diminuição na emissão de poluentes, entre tantos (SANTOS et al., 2012).

O rendimento do carvão vegetal gira em torno de 25% a 35% com base na madeira seca (BRITO; BARRICHELO, 1981). Na Tabela 2 é apresentado o desempenho dos fornos de carbonização no Brasil, assim como o rendimento da madeira por metro de carvão.

A pirólise lenta também provoca uma contração da madeira na rota do carvão vegetal. Tem como regra geral, que são necessários entre 1,8 a 2,5 metros cúbicos de madeira empilhada (estéreos - st) para produzir um metro cúbico de carvão (MDC). Ou ainda, que a cada 4,5 a 5 m³ sólidos de madeira de eucalipto são produzidos 1.000 kg de carvão vegetal 100% seco.

Tabela 2: Desempenho dos fornos de carbonização no Brasil.

| Tipo de construção | Ciclo de operação | Capacidade | | Rendimento volumétrico (st/MDC) |
|---|-------------------|------------|--------------|---------------------------------|
| | | Lenha (st) | Carvão (MDC) | |
| Alvenaria com fonte interna de calor | | | | |
| Encosta ou barranco | 240 | 20 | 8,7 | 2,3 |
| Rabo quente | 144 - 168 | 20 | 8 | 2,5 |
| Superfície JG | 144 | 10 - 11 | 4 - 5 | 2,2 |
| Retangular V&M | 264 - 312 | 180 - 240 | 95 - 130 | 1,8 |
| Retangular ACESITA | 264 | 110 | 65 | 1,8 |
| Metálicos com fonte interna de calor | | | | |
| JG semicontínuo | ND | ND | ND | ND |
| Metálicos com fonte externa de calor | | | | |
| DPC semicontínuo | 72 | 80 | 53,3 | 1,5 |

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2012).

Na Europa, as formas de produção que eram altamente poluidoras nos processos de carbonização industrial foram substituídas por mecanismos para recuperação dos subprodutos que operam de forma contínua. Dentre as tecnologias, estão ReichertLurgi (também conhecido como processo Degussa) e o Sific-Lambiotte (comercializado no Brasil

como processo Carboprem), que foram criados em 1935 e 1947, respectivamente (SANTOS et al., 2012).

2.5.3.1 Fornos de encosta

Os fornos de encosta, Figura 13, são utilizados em regiões que apresentam topografia acidentada, aproveitando o desnível natural do terreno para sua construção. A cúpula do forno é apoiada sobre a borda do terreno, que assume a função de parede do forno, o que reduz a quantidade de material utilizado em sua construção (LEITE, 2013).

Figura 13: Forno de Encosta.



Fonte: Alto da Montanha (2014).

O diâmetro deste forno varia de 3 a 4 metros e a altura entre 2,5 e 2,8 metros. O rendimento deste tipo de forno atinge 32% de carvão vegetal, em consequência de que a maior parte está em contato direto com o solo, acarretando menores perdas térmicas para o ambiente e favorecendo a carbonização. Entretanto, requer maior tempo de resfriamento, diminuindo a produtividade (LEITE, 2013).

O controle da carbonização é realizado através da coloração dos gases emitidos pelas chaminés, que podem emitir gases com diferentes aspectos, já que a frente de carbonização se desenvolve de maneira desuniforme. O ciclo completo de carbonização pode levar de cinco a nove dias (LEITE, 2013).

2.5.3.2 Fornos de rabo quente

Cerca de 80% da produção de carvão vegetal no Brasil é realizada em fornos de alvenaria do tipo rabo-quente. A organização desse sistema consiste em várias baterias de fornos de carbonização. Cada bateria está sob responsabilidade de um carvoeiro que cuida da carga, da descarga, do acendimento e da manutenção dos fornos, entrada e saída de ar,

também denominados de “tatus” e “filas” ou “baianas” respectivamente (PINHEIRO et al., 2005).

Figura 14: Fornos de “rabo-quente”.



Fonte: Loturco (2018).

Segundo OLIVEIRA et al. (2014), os fornos de “rabo-quente” (Figura 14) são mais baratos em consequência do menor número de tijolos utilizados, além de não haver construção de dutos, fornalha e chaminé. É estimado que cada unidade possua vida útil de 2 a 5 anos.

Para uma mesma produção de carvão vegetal e, portanto, uma mesma receita, os fornos de “rabo-quente” apresentam rendimento gravimétrico de 25%, enquanto que o sistema de fornos-fornalha, 32%, o que acarreta maior consumo de madeira (OLIVEIRA et al., 2014).

A capacidade de produção de um forno de “rabo-quente” é cerca de 5 m³ de carvão (MDC) por fornada (PINHEIRO et al., 2005). De acordo com os valores de lucratividade obtidos por OLIVEIRA et al. (2014), para cada R\$ 100,00 de carvão vegetal comercializados, o produtor obterá lucro igual a R\$15,00.

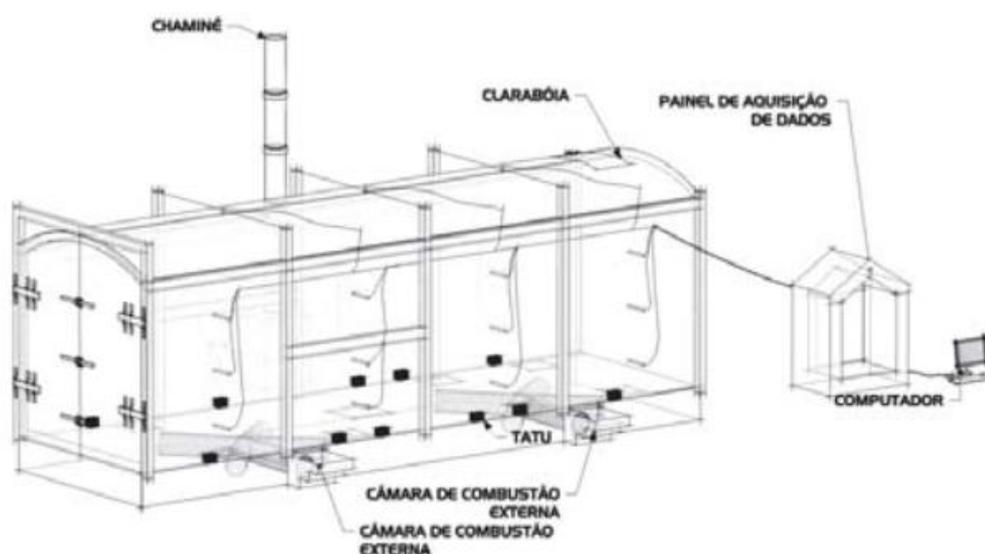
A implantação destes fornos se dá em grupo, formando uma carvoaria. O processo completo de produção desse tipo de forno dura cerca de sete dias. Nos primeiros três dias ocorrem à carbonização, após essa etapa, é necessário mais três dias para o resfriamento do carvão e, por último, o descarregamento. Durante todo o processo não ocorre nenhum controle tecnológico de qualidade, os aspectos para comercialização são averiguados com base na experiência dos operários e o tempo de carbonização é definido pela coloração da fumaça expelida dos orifícios dos fornos (LEITE, 2013).

2.5.3.3 Fornos retangulares

Os modelos produtivos com fornos retangulares, de alvenaria, possuem dimensões grandes, alta capacidade de enforamento e bom isolamento térmico (SILVA et al., 2014).

Os fornos de alvenaria para carbonização de madeira sofreram grandes modificações, que objetivaram maior eficiência e produtividade, em função da crescente demanda do consumo de carvão vegetal como fonte energética. Inseridos na década de 1990, com formato inovador e maior dimensionamento ao forno retangular (Figura 15), permitiu a mecanização nas etapas de carregamento e descarregamento, minimizando tempo, mão de obra e instrumentação, no acompanhamento térmico do processo de carbonização (ARRUDA et al., 2011).

Figura 15: Representação esquemática de forno retangular.



Fonte: Arruda et al. (2011).

Os fornos retangulares possuem grande capacidade volumétrica, podendo chegar até 700st (estéreo) de madeira de enforamento e alcançar uma produção média em carvão de 350 MDC. Os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal chegam a 35%, em média (LEITE, 2013).

O processo de carbonização dos fornos retangulares leva cerca de doze dias, incluindo as etapas de carregamento, ignição, carbonização, resfriamento do leito de carvão e descarga¹ totalmente concluídas.

A viabilidade econômica da construção destes fornos é associada à unidade de produção de carvão vegetal, cujo valor mínimo é de 500 m³/mês. Segundo BRITO (2010)

¹ As etapas se referem ao processo de carbonização. A descarga é referente à retirada do carvão do forno.

apud LEITE (2013), a construção de fornos retangulares contabiliza cerca de R\$ 200.000,00 /forno².

A Tabela 3 permite avaliar a conversão de biomassa (lenha) em energia (carvão vegetal) para carbonização nos fornos retangulares de 160 estéreos, no estudo realizado por Arruda et al. (2011).

Tabela 3: Balanço de massa e energia despendida e resultante no processo de carbonização em fornos retangulares de 160 estéreos.

| Tipo | Massa (kg) | | Energia (%) | |
|--------------|------------|--------|-------------|-------|
| | Entrada | Saída | Entrada | Saída |
| Lenha | 76.641 | | 100 | |
| Água | | 31.301 | | 9 |
| Carvão | | 12.723 | | 36 |
| Perdas | | 32.617 | | 55 |
| Total | 76.641 | 76.641 | 100 | 100 |

Fonte: Modificado Arruda et al. (2011).

Tal estudo demonstrou que ocorre perda de energia de 9% na secagem da lenha. Essa energia despendida para evaporação da água da lenha correspondeu a 14 m de carvão (MDC). A energia prevista no final do processo, na forma de carvão vegetal, foi inferior a 50%. As perdas de energia no sistema, através das paredes, fumaça, aquecimento da lenha, queima e resfriamento do carvão foram de 55%. Para tanto, verificou-se que as perdas correspondem a 64% (100 MDC), sendo significativamente maiores que o rendimento de carvão vegetal que é de 36% (56 MDC) (ARRUDA et al.;2011).

De acordo com Arruda et al. (2011), os resultados da conversão de massa em energia apresentam perdas maiores do que os ganhos, entretanto as perdas estão relacionadas a alguns parâmetros como a umidade da lenha e o controle do processo de carbonização e não ao tipo de forno.

2.5.3.4 Fornos cilíndricos

Os fornos cilíndricos metálicos, alternativo aos sistemas compostos por fornos de alvenaria, realizam a produção integrada de carvão vegetal e um sistema auxiliar de recuperação e aproveitamento dos gases/fumaça da carbonização, o que permite o aproveitamento dos subprodutos oriundos do processo e a redução significativa das emissões atmosféricas. O rendimento gravimétrico desse sistema está entre 30 a 38%,

² Considerando o índice INPC (Índice Nacional de Preços ao Consumidor), e as datas inicial de janeiro de 2010 e final de janeiro de 2018, o valor de R\$ 200.000,00 corresponde a R\$ 326.360,18, segundo calculadora do Banco do Brasil, disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/folhainvest/calculadoras-correcao.shtml>.

destacando os ganhos no tempo de carbonização e no resfriamento da carga de carvão (SILVA et al.; 2014).

2.6 APLICAÇÕES DO CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal, cujo nome botânico é “Carbo activatus”, é obtido através da queima ou carbonização da madeira. Por ser uma forma de energia barata, abundante e acessível, o carvão vegetal é bastante utilizado nas áreas urbana e rural, tanto para uso doméstico quanto comercial.

Comumente utilizado como combustível para aquecedores, lareiras e churrasqueiras, tem forte atuação na produção de ligas metálicas como termorreductor, especialmente na produção de ferro-gusa e aço.

No Brasil o maior consumidor de carvão vegetal é o setor industrial correspondente a 85%, seguido do residencial 9% e comercial 1,5%, como pizzarias, padarias e churrasqueiras (FROEHLICH; MOURA, 2014). Por se tratar de um insumo renovável e pouco poluente quando comparado aos combustíveis fósseis, o carvão vegetal é amplamente utilizado pelas siderúrgicas brasileiras como agente redutor do minério de ferro (ARRUDA et al., 2011).

A queima do carvão vegetal fornece calor para aquecer o sistema, permitindo a desoxidação do ferro através das reações entre os óxidos ferrosos contidos no minério e o carbono fornecido pelo carvão vegetal (UHLIG; GOLDEMBERG; COELHO, 2008).

As propriedades do carvão vegetal são diversas e propiciam uma gama de aplicações em diversos setores. No setor industrial, além das siderúrgicas, pode-se citar o uso do carvão vegetal em substituição aos combustíveis fósseis na combustão de fornos e caldeiras de cimento, cal e gesso (PAULA; SILVA; BERNARDO, 2010). O emprego desse material, ainda que de forma indireta, está também nas indústrias da construção civil, automobilística, aeronáutica e naval.

Na construção civil, o carvão vegetal é aplicado em concretos, fabricação de cimento Portland pozolânico, em argamassas, aterros estruturais, bases estabilizadas e solos modificados, e como filler em misturas betuminosas como preenchimento de vazios capilares em materiais (TANCREDI, 2010). No nivelamento de lajes de piso (Figura 16), seu emprego se deve ao fato de ser um material leve e atender aos requisitos construtivos de execução sem agregar peso significativo à estrutura.

Figura 16: Aplicação de carvão vegetal em laje de piso.



Fonte: Própria Autora (2019).

No setor da fabricação, compõe os grupos com maior potencial para desenvolver novas aplicações. Destacam-se a fabricação de artefatos como blocos, tijolos, placas, lajotas e painéis (GIUSEPPE, 2010).

Durante a produção de carvão vegetal são obtidos alguns subprodutos, como o alcatrão vegetal e o carvão ativado que também possui aplicação no mercado.

O carvão ativado, de alta porosidade e superfície específica, em combinação com areia é empregado na despoluição de gases tóxicos e purificação de água por adsorção de toxinas (SASAKI, LIMA, QUINÁIA, 2014; PATERNIANI et al., 2011). O material ainda é usado para fins medicinais e farmacêuticos. O alcatrão pode ser encontrado em medicamentos dermatológicos, em pavimentações e na indústria de corantes sintéticos.

Schvartsman (1999) e Lopes, Matheus (2012) relatam o uso do carvão ativado como um dos melhores processos de descontaminação digestiva via oral. Em eventos hemorrágicos, para controle de sangramento, sugere-se o uso de fatores específicos de coagulação, sendo um deles o carvão ativado (FLATO et al., 2011).

Na literatura ainda é possível encontrar aplicações do carvão vegetal como auxiliador na compostagem para enriquecer o composto em teor de ácidos húmicos, secagem de grão e folhas, fertilizantes e substratos agrícolas para fixação de umidade e nutrientes, cura de tabaco e defumação de peixes e carnes, componentes e produtos elétricos no setor eletroeletrônico, catalizador em processos químicos, dentre outras (LEITE, 2013).

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

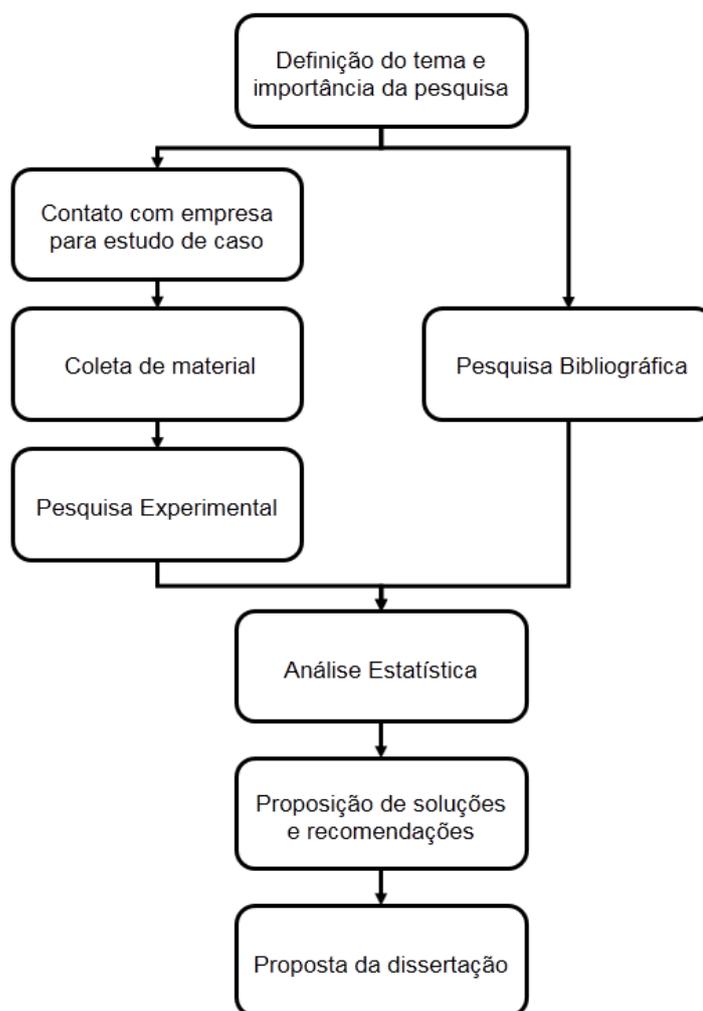
Neste capítulo são apresentados os procedimentos para o desenvolvimento da pesquisa. Preliminarmente, foi necessária uma revisão sistêmica de pesquisas exploratórias, acompanhando estudos relacionados ao tema. Com isso, conhece-se melhor as alternativas sustentáveis para uso de resíduos agroindustriais, no tocante ao resíduo de carvão vegetal no setor da construção civil, em especial, sua aplicação às matrizes cimentícias.

O método de pesquisa adotado foi o experimental. Segundo GRESSLER (2004, p.59),

“o objetivo da pesquisa experimental é investigar uma possível relação de causa e efeito por meio da exposição de um ou mais grupos em uma ou mais condições de tratamento e comparar os resultados com um ou mais grupos de controle que não receberam determinado tratamento”.

Continuando GRESSLER (2004), menciona que a pesquisa tem por finalidade a solução de um problema e o método visa orientar a busca da solução desse problema. Para essa autora, o método científico pode ser definido como uma sucessão de passos estruturados e orientados no sentido de garantir a precisão e a validade dos resultados da pesquisa.

O presente trabalho experimental foi realizado em parceria com uma empresa carvoeira, a qual se apresentou interessada e se dispôs à realização da pesquisa científica. Após a coleta dos materiais, o desenvolvimento da pesquisa se deu nos laboratórios, onde foram estudadas as reações de matrizes cimentícias com a incorporação de resíduos de carvão vegetal, assim como, as interações de seus elementos. Vale salientar que esse estudo foi desenvolvido em parceria com a Universidade Estadual de Minas Gerais – UEMG Passos. A Figura 17 ilustra simplificada a estrutura geral da pesquisa de mestrado.

Figura 17: Estrutura da pesquisa de mestrado.

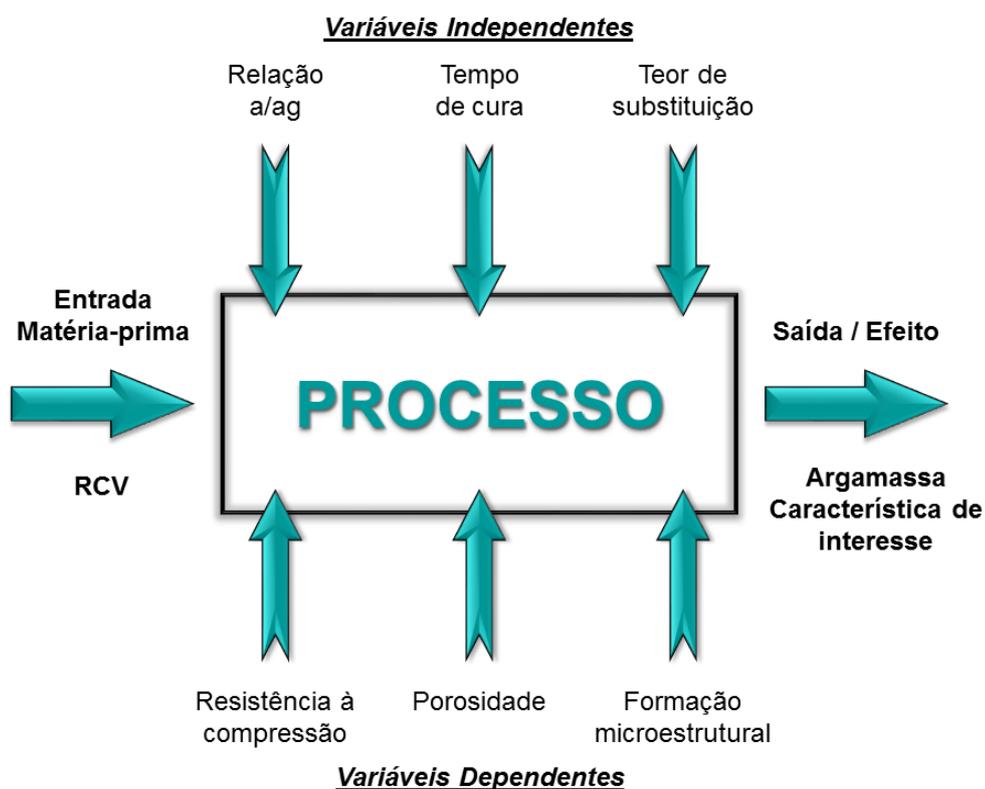
Fonte: Própria Autora (2019).

3.1 VARIÁVEIS

A pesquisa experimental, conforme Rampazzo (2005) consiste na manipulação das variáveis, proporcionando o estudo da relação entre causas e efeitos de um determinado fenômeno. Logo, para atingir os resultados, o pesquisador utiliza aparelhos e instrumentos apropriados, capazes de tornar perceptíveis as relações existentes entre as variáveis envolvidas no objeto de estudo.

A Figura 18 apresenta as variáveis independentes, cujos fatores são controláveis no desenvolvimento experimental, e as variáveis respostas ou dependentes, cujos fatores não são controláveis, tais como as propriedades das argamassas.

Figura 18: Variáveis do processo experimental.



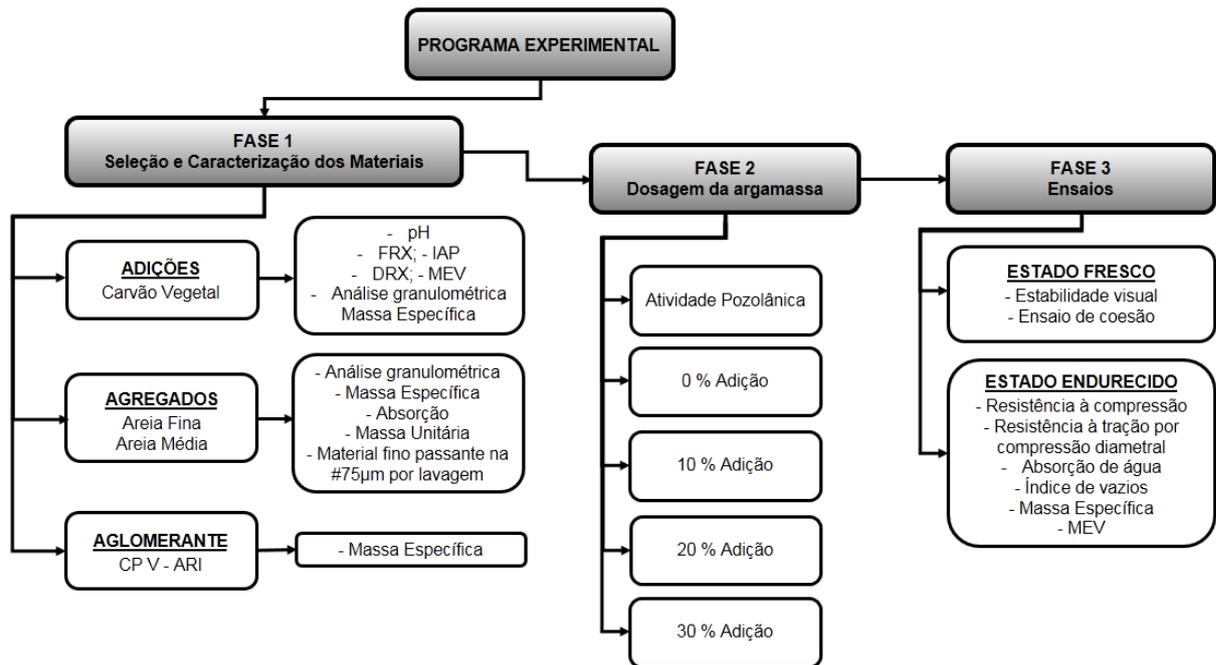
Fonte: Própria Autora (2019).

3.2 DETALHAMENTO DO EXPERIMENTO

Em síntese, o procedimento da pesquisa ocorrerá nas seguintes etapas: Descrição da área de pesquisa; panorama do centro produtor; a seleção das amostras e os ensaios para caracterização dos materiais, o estudo de dosagem para produção de argamassa e os ensaios no estado fresco e endurecido. Na Figura 19 é apresentado o fluxograma com as fases do programa experimental.

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Minas Gerais, unidade Passos-MG (UEMG) e no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE), junto ao Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Figura 19: Fases do programa experimental.

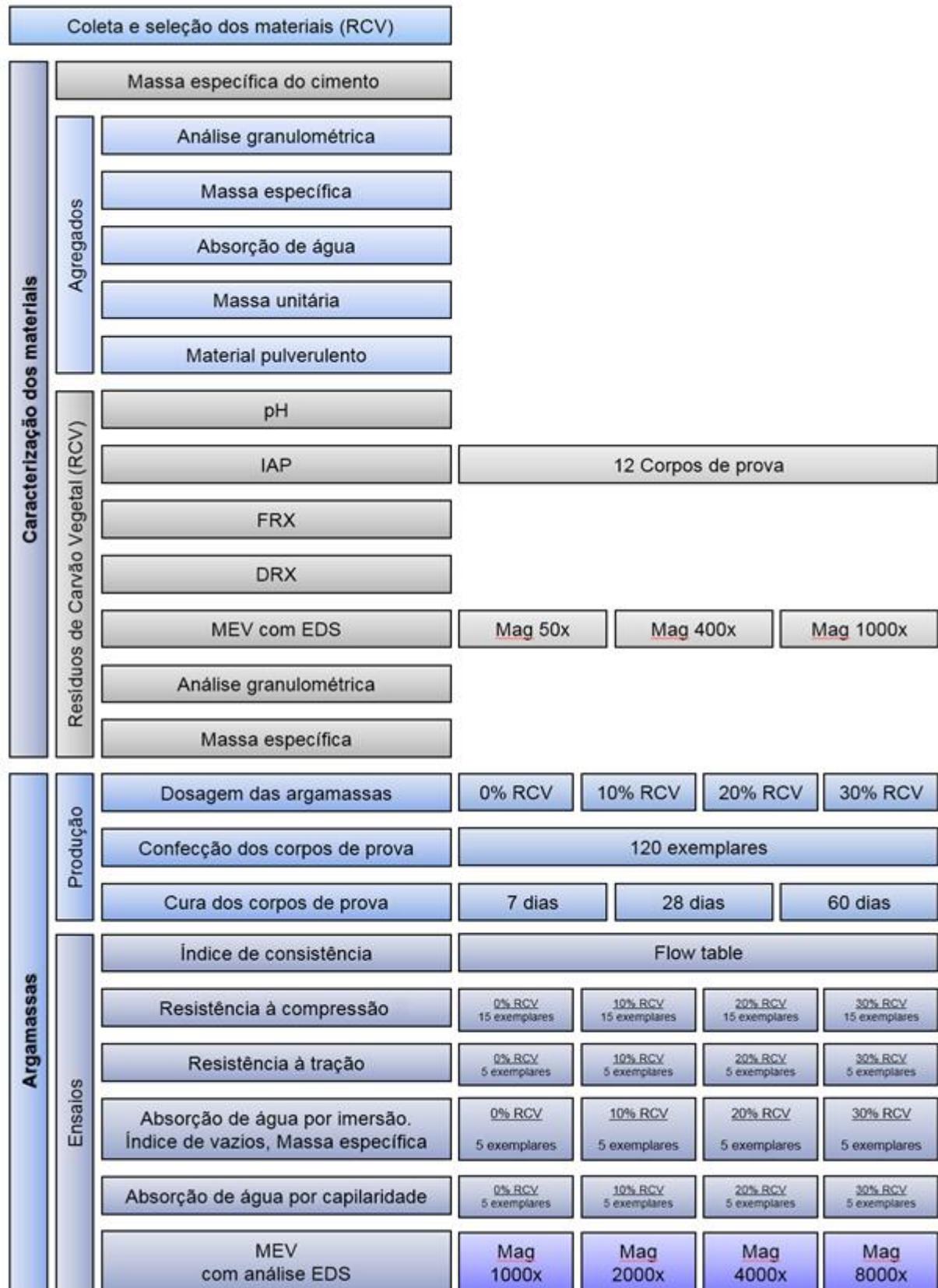


Fonte: Própria Autora (2019).

O programa experimental para produção das argamassas foi planejado considerando uma matriz 1x4, com um tipo de adição e três teores de substituição parcial da areia fina. Experimentalmente foi definido o traço de argamassa de referência com 0 % de adição mineral. Posteriormente, foi realizada a substituição parcial do consumo de areia fina em volume na argamassa de referência, nos teores de 10 %, 20 % e 30 %, por resíduos de carvão vegetal.

A Figura 20 apresenta de forma sucinta os ensaios e alguns dados pertinentes à sua realização.

Figura 20: Sequência dos ensaios.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.3 COLETA DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL

3.3.1 Carvoaria

O centro produtor da Empresa colaboradora, opera em regime intermitente de trabalho, no período das 7h30min às 17h00, produzindo carvão vegetal, desativada aos finais de semana e para realização de manutenção preventiva e descanso dos trabalhadores.

O beneficiamento do carvão vegetal conta com 18 funcionários, 10 deles trabalhando no setor de produção e 8 no setor de transporte.

A área onde realizou a coleta dos resíduos de carvão vegetal localiza-se no Sudoeste de Minas Gerais, no município de Passos, na MG 050. A Figura 21 identifica a carvoaria em relação ao município de Passos-MG.

Figura 21: Imagem por satélite da localização da carvoaria em relação ao município de Passos-MG.



Fonte: Modificado de Google Maps, 2018.

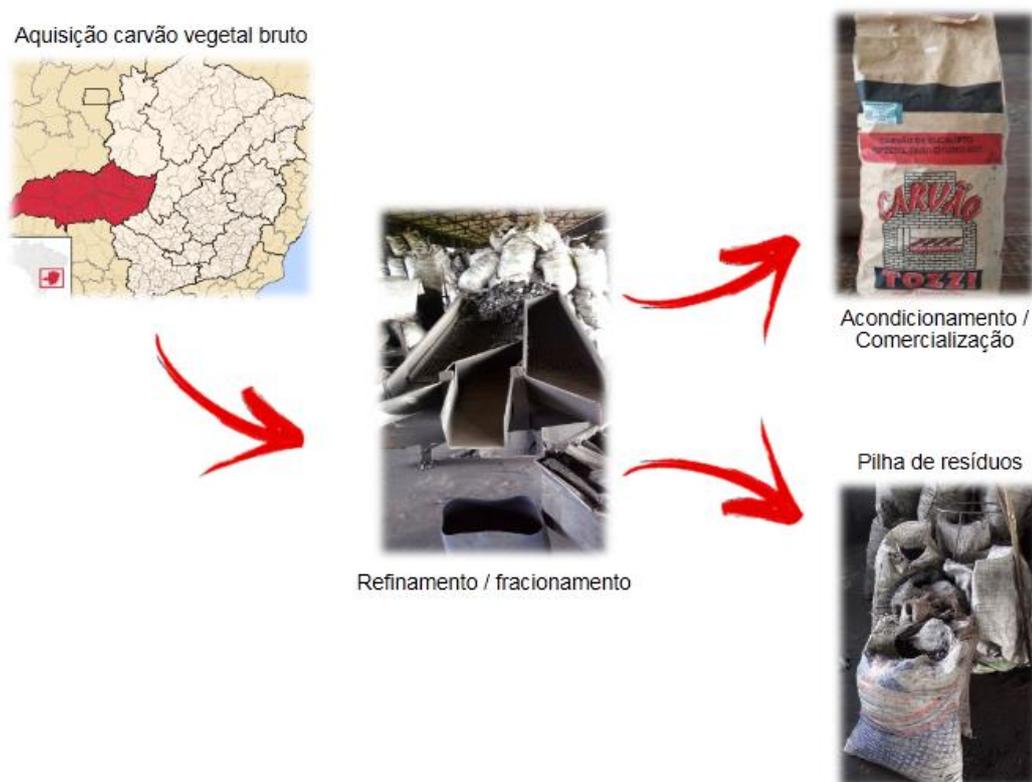
Os resíduos de carvão vegetal são obtidos a partir da queima/carbonização de madeira Eucalipto, comercializados, neste caso específico, como combustível para churrasqueiras e fogões a lenha, além de abastecer alguns setores industriais, como as siderúrgicas.

3.3.2 Beneficiamento do carvão vegetal

A empresa carvoeira não realiza o processo de carbonização do carvão, não possui fornos nem plantio de eucalipto. A unidade se dedica única e exclusivamente ao processamento, ou seja, o fracionamento do carvão no estado bruto e sua embalagem para a distribuição no mercado consumidor.

O beneficiamento do carvão vegetal ocorre conforme esquematizado na Figura 22. A empresa adquire cerca de 3200 toneladas de carvão vegetal por semana no estado bruto, fornecidos em sua maioria por carvoarias localizadas no município de Bambuí-MG e no triângulo mineiro.

Figura 22: Beneficiamento do carvão vegetal pela empresa.



Fonte: Própria Autora (2019).

De posse do material, procede-se com o refinamento, separando-o de acordo com as dimensões e características de carbonização (queima) e posterior acondicionamento em embalagens para comercialização.

Desse total, cerca de 80% do material é carvão vegetal pronto para uso e 20% considerado como resíduo. Enquadra-se como resíduo a moinha, o tissot e o material fino (pó). Os materiais são armazenados em barracão de estrutura metálica, conforme Figura 23, até que o descarte seja realizado.

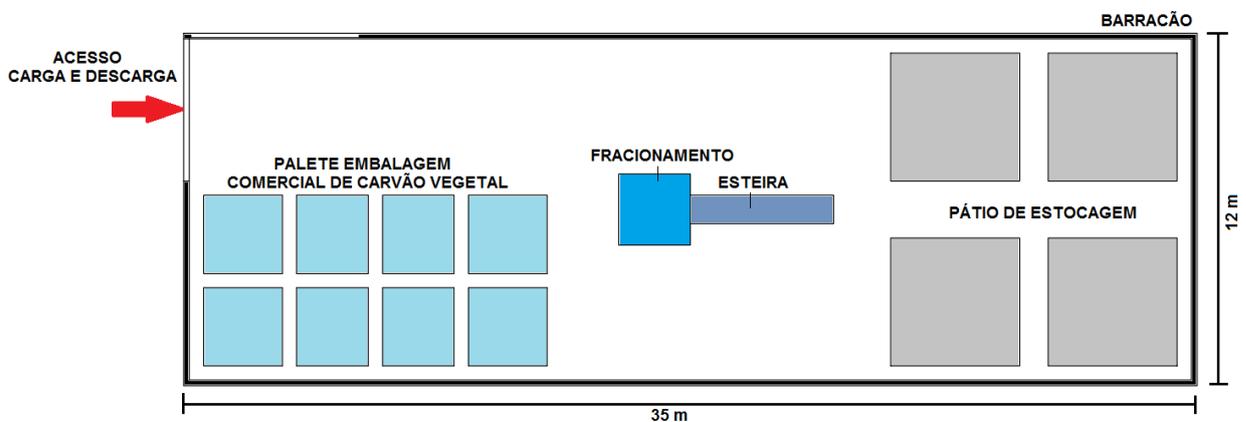
Figura 23: Barracão onde são armazenados os produtos e os rejeitos de carvão vegetal.



Fonte: Própria Autora (2019).

A Figura 2 mostra o layout simplificado do galpão da fábrica estudada. A fábrica conta com uma área destinada a estocagem do carvão vegetal no estado bruto localizada de forma estratégica a fim de facilitar o fracionamento dos produtos e acondicionamento em embalagens comerciais. Após acondicionamento dos produtos, eles são destinados aos paletes até a data de entrega aos consumidores.

Figura 24: Galpão da empresa de carvoeira.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.3.3 Descrição dos materiais

Na produção de carvão vegetal são gerados os produtos, alvo da empresa carvoeira, e os subprodutos, os quais não agregam valor à fabricação sendo descartados de forma imprópria. Num quadro geral, a comercialização desses derivados contribui com uma parcela considerável de agentes agressivos dispersos no meio ambiente.

Apesar da existência de diferentes fornecedores de carvão vegetal na região, para os ensaios desta dissertação foram selecionados materiais brutos fornecidos por um mesmo fabricante e de mesmo número de lote de fabricação / distribuição.

O fracionamento do carvão vegetal ocorre por meio de separadores mecânicos com auxílio de mão de obra operária. Na Figura 25 é possível verificar algumas etapas do processo.

Figura 25: Fracionamento do carvão vegetal bruto.



Fonte: Própria Autora (2019).

Os produtos e subprodutos da empresa carvoeira são descritos a seguir:

Carvão convencional: mais utilizado pela população, em churrasqueiras.

Carvão especial: carvão com dimensões superiores ao convencional, utilizados para abastecer setores industriais.

Moinha: material com dimensões inferiores, destinado às indústrias siderúrgicas e/ou ao setor de edificações no preenchimento de lajes. Usado também como matéria-prima para briquetes, conforme Figura 26.

Tissot: material que não alcançou as características requeridas para comercialização como carvão. Utilizado em fornos de padarias e outros comércios com a mesma finalidade.

Material fino: sem reaproveitamento que ficam dispersos no ar e no chão do galpão da fábrica.

Figura 26: Materiais derivados do beneficiamento do carvão: a) Carvão vegetal; b) Briquetes; c) Material fino.



Fonte: Própria Autora (2019).

Periodicamente é realizado o recolhimento do material fino para fins de descarte em áreas incertas, ou seja, ora em rios, ora em aterros.

A empresa disponibiliza os equipamentos de proteção individual aos trabalhadores, mas os funcionários consideram incômoda a utilização deixando de fazer uso, apesar da recomendação dos responsáveis pela empresa.

3.3.4 Selos de certificação

Para comercialização do carvão vegetal é necessário que a Empresa apresente o Selo de Origem Florestal (SOF) para carvão de uso doméstico e o Selo de Origem Florestal para Exportação (SOFEX) para exportação de carvão, fornecidos pela Associação Brasileira de Produtores de Eucalipto para uso Doméstico (ABEPD) aos empacotadores, com autorização do IEF – Instituto Estadual de Floresta, mediante prova de origem do carvão vegetal utilizado e o volume do mesmo.

3.3.5 Seleção das amostras RCV para estudo

Para a seleção das amostras de RCV, determinou-se como população amostrada a parte acessível para retirada das amostras. Esse tipo de amostragem é probabilístico, onde, a não ser por pequenas diferenças inerentes ao acaso, a amostra possui as mesmas características básicas da população, em relação às variáveis que se deseja estudar, garantindo a representatividade da população.

A amostra constitui-se na soma de parcelas individuais, obtidas em pontos, profundidades e/ou instantes diferentes, misturadas de forma a se resultar numa amostra homogênea, isto é, obtida pela alíquota dos resíduos.

As amostras foram coletadas pelos próprios funcionários da carvoaria e armazenadas em sacos de ráfia Figura 27, no laboratório, foram quarteadas conforme a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Figura 27: Amostra em sacos de ráfia.



Fonte: Própria Autora (2019).

No laboratório da UEMG, o beneficiamento dos resíduos de carvão vegetal se deu com a secagem em estufa a temperatura de 100 ± 5  C por 24 horas e peneiramento na peneira de malha 2,36 mm, para controlar a granulometria do material utilizado e conseqüentemente retirada dos rejeitos grossos.

3.4 CARACTERIZA O TECNOLÓGICA DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados na produ o das matrizes cimentícias foram selecionados conforme disponibilidade na cidade de Passos – MG. Após a aquisi o retirou-se amostras para caracteriza o, de acordo com as especifica es da Associa o Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) pertinentes a cada material.

Os materiais empregados neste trabalho foram os resíduos de carvão vegetal (RCV), o cimento CP V ARI, a areia média, a areia fina e a  gua. A fim de evitar a possibilidade de altera es devido   diferença entre lotes de materiais, fez-se a coleta dos materiais e na quantidade suficiente para todas as dosagens.

3.4.1 Cimento

O cimento *Portland* utilizado para este trabalho foi o CP V ARI fabricado pela Votorantim Cimentos, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos. A escolha deste cimento se deve por ser um produto que tem a peculiaridade de atingir altas resistências nos primeiros dias.

Para caracterizar o cimento Portland CP V ARI determinou-se a massa específica conforme estabelecido pela NBR 16605 (ABNT, 2017), Cimento Portland e outros materiais em pó. A Figura 28 mostra os materiais usados nos ensaios de caracterização.

Figura 28: Materiais utilizados no ensaio de massa específica do cimento.



Fonte: Própria Autora (2019).

Os demais dados referentes às características físicas e às características químicas, tal como, superfície específica, perda ao fogo, óxido de magnésio (MgO) e trióxido de enxofre (SO₃) foram coletados junto ao fabricante. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 4 e 5.

Tabela 4: Massa Específica CPV ARI.

| NBR NM 23:2001 | | |
|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Massa Específica Cimento Portland | | |
| m (g) | V (cm ³) | γ (g/cm ³) |
| 60 | 19,5 | 3,08 |

Fonte: Própria Autora (2019).

A massa específica do cimento é importante para a determinação do volume ocupado pelas partículas no estudo de dosagem do concreto.

Tabela 5: Boletim Técnico Cimento Portland.

| Boletim de Ensaios de Cimento | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|---------------------|------------|-------|-----------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------------------|---------------------------|------------|--------|--------|--------|-----|
| Produto: | CPV-ARI Obras | | | | Norma: | NBR 5733 | | | | Atualizado em: | 30/06/2018 | | | | |
| Marca: | Itaú | | | | Unidade: | Itaú de Minas | | | | Mês/ano de ref.: | jun/18 | | | | |
| ENSAIOS | Químicos | | | | | | | | Físicos e Mecânicos | | | | | | |
| | Teores (%) | | Finura (%) | | Blaine | Água de consist. (%) | Tempo de Pega | | Expansib. A quente (mm) | Resistência à comp. (Mpa) | | | | | |
| PF | MgO | para C ₃ | RI | # 200 | # 325 | | (cm ² /g) | Início (min) | | Fim (min) | 1Dia | 3Dias | 7Dias | 28Dias | |
| Limites de Norma | ≤ 4,5 | ≤ 6,5 | ≤ 3,5 | ≤ 10 | ≤ 6,0 | N/A | ≥ 3000 | N/A | ≥ 60 | ≤ 600 | ≤ 5,0 | ≥ 14,0 | ≥ 24,0 | ≥ 34,0 | N/A |
| 21.06.2018 | 3,98 | 4,39 | 3,23 | 0,74 | 0,2 | 0,8 | 5410 | 32,80 | 170 | 280 | 1,0 | 29,40 | 35,40 | 39,60 | — |
| 23.06.2018 | 4,15 | 4,27 | 3,28 | 0,50 | 0,0 | 0,1 | 5360 | 32,10 | 170 | 310 | 0,5 | 29,00 | 34,70 | 39,60 | — |

Fonte: Boletim de ensaio Votorantim Cimentos S/A, 2018.

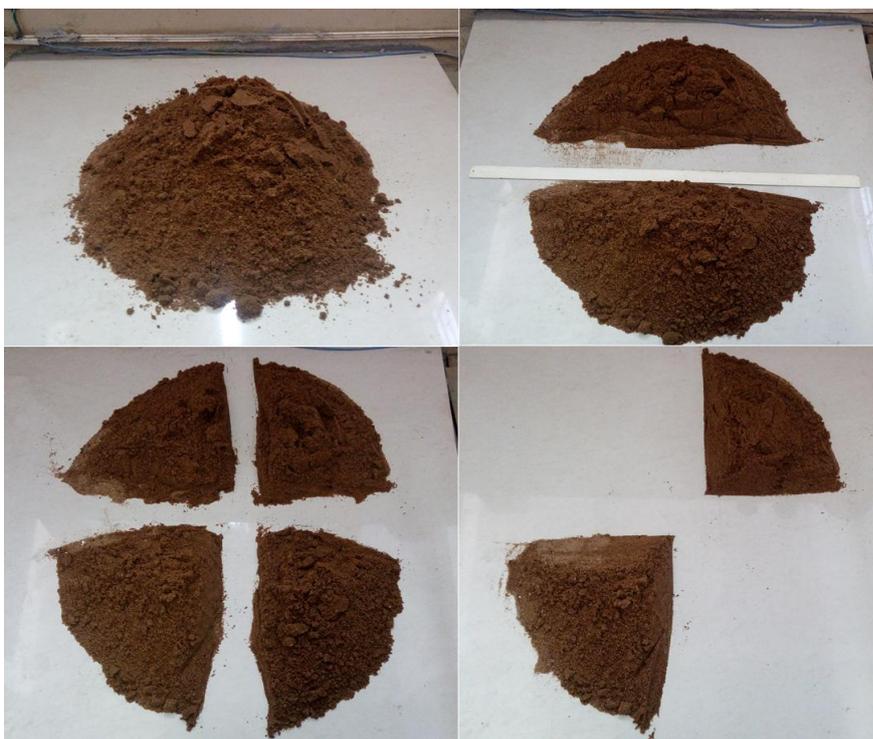
Todos os resultados apresentaram conformidade com as normas vigentes.

3.4.2 Agregados

Todos os agregados foram provenientes da região de Passos – MG, sendo comercialmente fornecidos em sacos de ráfia, em lotes com mesma data de embalagem. Foram utilizadas areia fina e areia média. A escolha desses agregados foi baseada na disponibilidade de materiais da região, para a construção de um esqueleto granular adequado à fabricação das argamassas.

O preparo das amostras obedeceu às recomendações preconizadas pela NBR NM 27 (ABNT, 2001). Executou-se a homogeneização e o quarteamento conforme ilustrado pela Figura 29.

Figura 29: Homogeneização/quarteamento dos agregados.



Fonte: Própria Autora (2019).

Os ensaios empregados para caracterização dos agregados obedeceram às recomendações normatizadas pela ABNT e realizados no Laboratório de Materiais UEMG/Passos (Departamento de Engenharia Civil) e confrontados ao da NBR 7211 (ABNT, 2009).

A Tabela 6 apresenta os ensaios realizados para caracterização dos agregados, bem como as normas técnicas estabelecidas para cada ensaio.

Tabela 6: Ensaio para caracterização dos agregados.

| Propriedades | Método de Ensaio |
|---|-------------------------|
| Módulo de finura | NBR NM 248 (ABNT, 2003) |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | |
| Massa Específica (g/cm ³) | NBR NM 52 (ABNT, 2009) |
| Absorção (%) | NBR NM 30 (ABNT, 2001) |
| Massa Unitária no estado solto (kg/m ³) | NBR NM 45 (ABNT, 2006) |
| Material fino passante na peneira 75 µm | NBR NM 46 (ABNT, 2003) |

Fonte: Própria Autora (2019).

3.4.2.1 *Análise Granulométrica dos agregados*

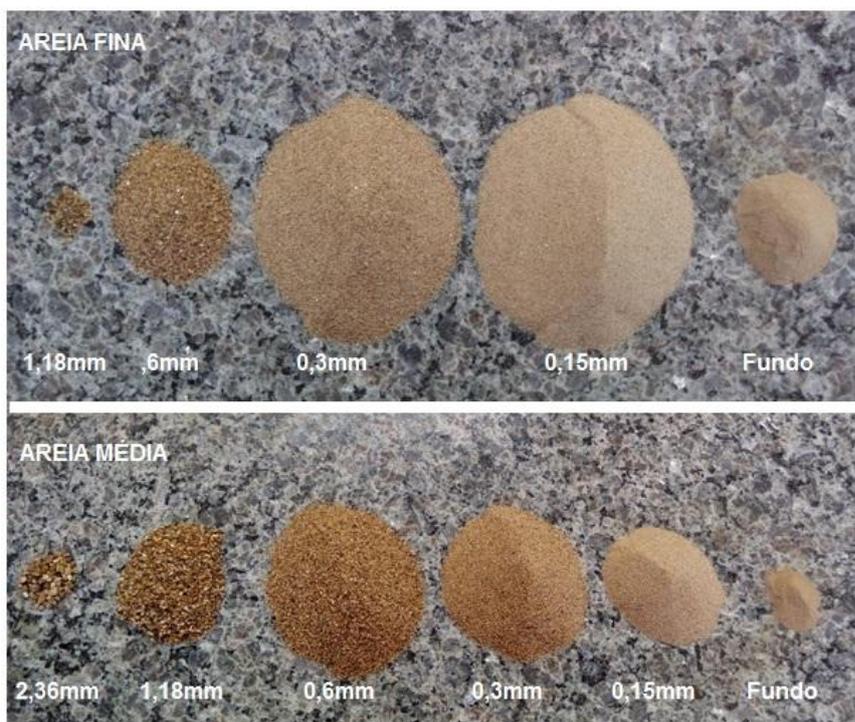
Os agregados - areia fina e areia média, foram secos e submetidos ao ensaio granulométrico segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foram utilizadas três amostras de 300g de agregado e o peneiramento foi realizado em um peneirador mecânico. Os resultados foram apresentados em gráficos representativos das porcentagens retidas em cada malha das peneiras e o módulo de finura da amostra, classificada de acordo com a norma. Na Figura 30 observa-se o conjunto de peneiras no peneirador mecânico e na Figura 31 a massa retida de cada peneira para a areia fina e para a areia média.

Figura 30: Conjunto de peneiras e peneirador.



Fonte: Própria Autora (2019).

Figura 31: Análise granulométrica dos agregados.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.4.2.2 Absorção do Agregado

A NBR NM 30 (ABNT, 2001) estabelece o método de determinação da absorção de água dos agregados miúdos, na condição saturado superfície seca. O pré-requisito para a realização do ensaio consiste na coleta da amostra pelo estabelecido na NBR NM 26 (ABNT, 2009).

Figura 32: Absorção dos agregados.



Fonte: Própria Autora (2019).

De acordo com a norma, absorção é o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de um líquido (água) em seus poros permeáveis, em relação a sua massa em estado seco.

3.4.2.3 Determinação da umidade dos agregados

Um dos componentes indispensáveis para a produção das argamassas, a areia, tem papel determinante para garantir a qualidade da mistura final, impactando características como resistência, durabilidade e trabalhabilidade. A falta de atenção com o teor de água presente na areia pode levar à perda de resistência do concreto e prejudicar a permeabilidade do material, implicando manifestações patológicas e pondo em risco a durabilidade da estrutura.

Figura 33: Secagem dos agregados em estufa.



Fonte: Própria Autora (2019).

Visando identificar o teor de umidade para reduzir variações de água na argamassa, realizou-se o ensaio por secagem da amostra via estufa, que consiste em pesar a areia úmida e a mesma quantidade de areia seca em estufa, conforme ilustrado na Figura 33.

3.4.2.4 Massa Específica dos Agregados

Os métodos para determinação da massa específica de agregados miúdos são o método da proveta e o método do frasco de Chapman, descrito na NBR 9776 (ABNT, 1987). Após a substituição da norma NBR 9776 (ABNT, 1987) pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), ocorreram alterações no procedimento de determinação da massa específica, além de acrescentar outras definições.

Com base nas considerações entre os métodos optou-se por realizar ambos nesta pesquisa, a fim de verificar se há diferença significativa entre os métodos.

MÉTODO ABNT NBR 9776 (1987)

Nesse método a amostra foi previamente seca e pesada. O frasco de Chapman preenchido com água até a marca de 200 ml. Com o auxílio de um funil a amostra foi

adicionada no frasco, agitando todo o conjunto para eliminar as bolhas de ar. Posteriormente, com o frasco em repouso, realizou-se a leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco, ou seja, o quanto a massa do agregado pode deslocar o volume de água (Figura 3).

Figura 34: Materiais usados na determinação da massa específica NBR 9776.



Fonte: Própria Autora (2019).

MÉTODO ABNT NM 52 (2009)

Para executar esse ensaio a amostra passou por um tratamento prévio, destinado a apresentá-la na condição saturado superfície seca (SSS). Esse procedimento visa garantir que o agregado não possua umidade superficial. Após o término desse procedimento, iniciou-se o ensaio conforme estabelecido em norma. A Figura 35 ilustra as etapas do ensaio para determinação da massa específica.

Figura 35: Etapas do ensaio de determinação da massa específica.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.4.2.5 Massa Unitária dos Agregados

A NBR NM 45 (ABNT, 2006) define o método para determinação da massa unitária dos agregados no estado solto e compacto. Uma das principais aplicações da massa unitária no estado solto é para o cálculo da dosagem do volume para produção de concretos e na obtenção do volume de vazios dos agregados.

Nesse estudo empregou-se o método C, onde, o material a ser ensaiado foi seco em estufa e separado numa quantidade superior que o volume do recipiente (150% do volume do recipiente). O agregado foi lançado ao recipiente com o auxílio da pá metálica, a uma altura em torno de 5 cm da borda superior deste, de forma a espalhar de maneira uniforme o

material dentro dele. O processo foi repetido até preenche-lo. Com o auxílio de uma régua, procedeu-se o nivelamento da superfície de forma a deixá-la nivelada em relação às bordas do recipiente. Os espaços vazios deixados pelo processo de nivelamento foram preenchidos, permitindo a regularização da superfície (Figura 36).

Figura 36: Etapas de determinação da massa unitária solta.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.4.2.6 *Materiais Pulverulentos*

A norma NBR NM 46 (ABNT, 2003) descreve o ensaio que permite verificar a quantidade de material fino passante na malha da peneira de 0,075 mm por lavagem. O excesso desse material prejudica a aderência entre a pasta de cimento e a argamassa, aumenta o consumo de água devido à alta superfície específica, acarretando retração e diminuição da resistência de concretos e argamassas.

Figura 37: Materiais utilizados no ensaio do teor de material pulverulento.



Fonte: Própria Autora (2019).

O ensaio consistiu no preparo da amostra (secagem em estufa e pesagem), prosseguindo com a lavagem no conjunto de peneiras, repetidas vezes, até que o material se apresentasse visualmente limpo. Na Figura 36 apresenta-se o conjunto de peneiras e os recipientes contendo água antes e depois da lavagem. A coleta da água nesses recipientes objetivou-se a comparação visual da limpidez entre a água.

Juntou-se todo o material retido nas peneiras ao material lavado, secou em estufa e verificou a quantidade de material pulverulento da amostra, conforme a Equação 1:

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Onde:

m = porcentagem de material mais fino que peneira de 75 μm por lavagem;

m_i = massa original da amostra seca, em gramas;

m_f = massa da amostra seca após a lavagem, em gramas.

3.4.3 Resíduos de carvão vegetal (RCV)

Visando estabelecer a alternativa mais adequada para a utilização dos resíduos de carvão vegetal, foi realizada a caracterização através de análises químicas, físicas, mineralógicas, morfológicas e avaliado seu potencial de aproveitamento como adição à argamassa.

3.4.3.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

A determinação do pH é importante para verificar a corrosibilidade do resíduo. Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), um resíduo é considerado corrosivo quando o pH da solução for inferior a 2 e superior a 12,5. Para esse ensaio a amostra (bloco padrão) foi submetida à lavagem com água deionizada, utilizando inicialmente um volume de água correspondente ao volume do bloco. A água dessa lavagem deve ser descartada e a amostra estará pronta para extração.

3.4.3.2 Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland

O ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) com o cimento Portland foi realizado de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014), para isso utilizou-se o cimento Portland CP II F 32 (Figura 38-a), areia normalizada, água e a amostra RCV. Foram produzidas uma argamassa com RCV e uma argamassa de referência (sem RCV), esta, foi confeccionada com uma proporção cimento-areia de 1:3 (em massa) e relação a/c = 0,48, naquela, 25% da massa do cimento foi substituída pelo RCV. Para manter o índice de consistência das argamassas produzidas com RCV em ± 10 mm do índice da argamassa de referência foi utilizado aditivo superplastificante Genuim 51.

Foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para cada traço (Figura 38-b).

Figura 38: Índice de atividade pozolânica: a) cimento CP II F-32; b) Corpos de prova.



Fonte: Própria Autora (2019).

Os corpos de prova permaneceram em cura imersa até a idade de ruptura (28 dias). O índice de desempenho foi calculado pela Equação 2:

$$I_{cimento} = \frac{f_c RCV}{f_c REF} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

$f_c RCV$ = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com RCV (MPa);

$f_c REF$ = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova de referência (MPa).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), o índice de desempenho mínimo com o cimento deve ser de 90%.

3.4.3.3 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição química das amostras de RCV foi determinada pela técnica de Espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX), é um processo semiquantitativo e quali-quantitativo, de identificação de elementos químicos e suas concentrações, em amostras de materiais líquidos ou sólidos. Segundo Bleicher e Sasaki (2000), o método utiliza energia de raios-X para provocar transições eletrônicas entre os orbitais dos átomos, e produzir radiações de fluorescência com comprimentos de onda diferentes para cada elemento atômico e intensidade relacionada com a sua concentração.

Para realização do ensaio foi utilizado o espectrômetro de fluorescência de raios-X de energia dispersiva EDX 720 Shimadzu do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Materiais (DEMa - UFSCar). O equipamento operou entre 5 e 50 kV e de 1 a 1000 μ A.

3.4.3.4 Difratometria de Raios-X (DRX)

Para identificação dos compostos mineralógicos existentes, será realizado o ensaio de difração de Raios-X com Difratometro Bruker, modelo D8 ADVANCE Eco, detector digital 160 canais SSD 160, localizado no LCE-DEMa-UFSCar. O equipamento foi operado na potência de 1,0 kW (40 kV x 25 mA). A fonte de raios-X é um tubo com ânodo de cobre com linha de emissão característica de 1,54 Å /8,047 keV, radiação Cu-K α , varredura de 5° a 90° e tempo de corrida 15 min com correção de fluorescência. A identificação dos compostos e os teores de material cristalino e amorfo foram quantificados pelo software EVA Application.

Figura 39: Difratometro D8 ADVANCE Eco.



Fonte: Própria Autora (2019).

A difratometria de raios X tem como objetivo, identificar as fases, amorfa ou cristalina, dos minerais que constituem o resíduo. Este ensaio contribui na avaliação da reatividade do resíduo, indicando, caso haja predominância da forma cristalina, baixa atividade e caso apresente-se amorfo, maior potencial pozolânico.

Em síntese, o ensaio consiste em uma técnica de identificação, qualitativa, de fases cristalinas em diversos materiais e a comparação dos picos (posição e intensidade) representados no difratograma, com um banco de dados referentes à cristalografia de minerais e rochas.

O resultado deste tipo de análise é apresentado sob a forma de um gráfico, o difratograma, cujas variáveis são o ângulo 2θ versus a intensidade dos picos difratados (eixo vertical). Os picos do difratograma são produzidos quando, para um dado valor de θ . As alturas dos picos são proporcionais às intensidades dos efeitos da difração.

3.4.3.5 Ensaio Microestrutural com Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica utilizada para caracterizar a microestrutura de materiais. Nela, um feixe de elétrons incide sobre a amostra promovendo interações físicas, as quais podem resultar no espalhamento elástico ou não elástico dos elétrons. No espalhamento elástico, a trajetória dos elétrons dentro da amostra é afetada, mas não ocorre alteração na energia cinética, e esses elétrons são denominados como retroespalhados. No espalhamento não elástico, ocorre a perda da energia cinética dos elétrons para os átomos da amostra, gerando assim elétrons secundários, elétrons Auger, raios-X e catodoluminescência. Por meio dos elétrons secundários é possível obter imagens da topografia da amostra em alta resolução. Por outro lado, os elétrons retroespalhados fornecem imagens de menor resolução, no entanto, é possível identificar as diferenças na composição química das fases pelo maior ou menor brilho nas imagens. Além da captação de imagens, os aparelhos de MEV equipados com detectores de energia dispersiva realizam a análise química das regiões de interesse nas amostras (DEDAVID, 2007).

Para caracterização morfológica dos resíduos de carvão vegetal usou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) por elétrons secundários da marca FEI, modelo INSPECT S50, no LCE – DEMa - UFSCar, Figura 40.

Figura 40: MEV INSPECT S50.



Fonte: Própria Autora (2019).

Amostras isolantes tendem a acumular a carga elétrica do feixe primário e geram artefatos na imagem. Deste modo, para a realização de micrografias em diversos níveis de aumento, visualizando o aspecto geral das partículas e detalhes particulares de algumas, a amostra de RCV foi posicionada em uma porta amostra com fita de carbono e recoberta com ouro (processo de metalização) para melhorar o nível de emissão de elétrons secundários. O aspecto da amostra preparada encontra-se na Figura 41. As imagens foram obtidas utilizando detector de elétrons secundários (SE), em condições de tensão de aceleração de 25 kV e distância de trabalho (WD) de aproximadamente 10 mm. O espectroscópio de raios X (EDX) utilizado é da marca EDAX PhiZAF.

Figura 41: Amostra de RCV preparada para ensaio de MEV.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.4.3.6 Análise da composição granulométrica dos resíduos de carvão vegetal

Os resíduos de carvão vegetal foram secos e submetidos ao ensaio granulométrico segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados foram apresentados em gráficos representativos das porcentagens retidas em cada malha das peneiras.

Por meio da análise realizada obteve-se também o diâmetro máximo característico, o módulo de finura e a possível caracterização dos agregados. Na Figura 42 observa-se a massa retida de cada peneira para o resíduo.

Figura 42: Massa de resíduos de carvão retida nas peneiras.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.4.3.7 Massa Específica dos Resíduos de Carvão Vegetal

O ensaio de determinação da massa específica dos resíduos de carvão vegetal foi realizado de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017). A Figura 43 mostra as etapas do processo.

Figura 43: Etapas do ensaio de massa específica dos resíduos de carvão.



Fonte: Própria Autora (2019).

3.5 ESTUDO EM ARGAMASSA

De posse dos resultados de ensaios de caracterização dos materiais, foram confeccionadas argamassas de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), procurando avaliar o potencial dos resíduos de carvão vegetal como adição, assim como as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

3.5.1 Materiais

Os materiais que se integrarão à mistura são:

- *Cimento Portland CP V – ARI*: material com alta resistência inicial. Recomendável para indústrias de artefatos e pré-moldados, pois, possibilita desforma rápida e maior produtividade.

- *Agregado Miúdo*: areia fina e areia média.

- *Adição (Resíduos de Carvão vegetal)*.

- *Água*: potável, disponível na rede de abastecimento onde se realizou o trabalho.

3.5.2 Produção de argamassas

A base deste estudo é a comparação de argamassas adicionadas de resíduos de carvão vegetal com a argamassa de referência (sem adição).

A confecção da argamassa de referência é indispensável para a comparação, pois a adição dos resíduos de carvão vegetal em substituição parcial da areia fina, provocará alterações na resistência mecânica em consequência das alterações microestruturais.

A adição de um resíduo em um determinado traço de argamassa tende a provocar, em uma análise inicial, aumento da demanda de água na mistura, pois o material adicionado aumenta a área superficial a ser molhada, alterando o abatimento desejado, e caso seja corrigido pelo acréscimo de água, ocorrerá a alteração da sua relação água/cimento.

As matrizes cimentícias foram produzidas no Laboratório de Materiais de Construção de Passos – UEMG, à temperatura ambiente, utilizando argamassadeira planetária com capacidade para 200 dm³ (Figura 4). Para que a argamassa em estudo não fique retida na extremidade, a mesma foi imprimada com uma mistura de cimento e areia na proporção 1:2 em massa e uma relação água/cimento de 0,55. Retirou-se o excesso da mistura antes da execução do primeiro traço de argamassa.

Figura 44: Argamassadeira planetária.



Fonte: Própria Autora (2019).

O traço de referência adotado foi 1: 1,00: 1,00: 0,55 (cimento: areia fina: areia média: a/c). Vale salientar que a proporção dos materiais foi determinada pelo teor de argamassa obtido em estudos prévios conforme Bortoletto et al. (2017). A areia fina foi substituída parcialmente pelo RCV nos teores de 0%, 10%, 20% e 30% (em volume) e a relação água/cimento foi mantida constante para todas as misturas. A composição dos traços (em massa) e o índice de consistência das argamassas obtido de acordo com as especificações da NBR 13276 (ABNT, 2005), estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Composições das argamassas.

| Composições | Proporção dos materiais | | | | |
|-------------|-------------------------|------|------------|-------------|------|
| | Cimento | RCV | Areia Fina | Areia Média | a/c |
| 0% RCV | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,55 |
| 10% RCV | 1,00 | 0,10 | 0,90 | 1,00 | 0,55 |
| 20% RCV | 1,00 | 0,20 | 0,80 | 1,00 | 0,55 |
| 30% RCV | 1,00 | 0,30 | 0,70 | 1,00 | 0,55 |

Fonte: Própria Autora (2019).

Todos os materiais foram pesados e imediatamente colocados na argamassadeira, obedecendo sempre à mesma sequência. Em todas as etapas de produção foi realizado a imprimação da argamassadeira antes da colocação dos materiais.

3.5.2.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova foram baseados nas recomendações da norma NBR 7215 (ABNT, 1996).

Antes de se proceder à moldagem dos corpos de prova, é sistemático que os moldes cilíndricos de 5x10 cm (diâmetro x altura) e suas bases sejam convenientemente revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral para facilitar posterior desmoldagem (Figura 45(a)).

Figura 45: Moldes utilizados (a); moldagem das argamassas (b); moldes com argamassa (c) e acondicionamento em câmara úmida (d).



Fonte: Própria Autora (2019).

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas da moldagem e acondicionados em câmara úmida (Figura 45 (c)), protegidos de intempéries, em superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra causa que possa perturbar a argamassa até a data de ensaio.

3.6 ENSAIOS NAS ARGAMASSAS

Pretendeu-se avaliar a influência dos resíduos de carvão vegetal nas propriedades mecânicas da argamassa no estado endurecido por meio dos ensaios de resistência à compressão, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), absorção por imersão, índice de vazios e massa específica, conforme NBR 9778 (ABNT, 2005), e a influência na durabilidade dos concretos endurecidos por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade, conforme a NBR 9779 (ABNT, 2012).

A escolha do ensaio de resistência à compressão axial deve-se a esta ser a propriedade empregada como principal parâmetro para definir e caracterizar as matrizes cimentícias (MASUERO, 2001).

É importante salientar que a utilização do ensaio de absorção por capilaridade não tem o intuito de verificar diretamente a qualidade das argamassas produzidas com resíduos de carvão, mas sim investigar se existem diferenças entre as argamassas com diferentes

teores de adição, e verificar indiretamente, a melhoria ou não da durabilidade do material resultante.

3.6.1 Ensaio de resistência à compressão axial de corpos de prova cilíndricos

Os procedimentos para o ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, segundo as recomendações da norma NBR 7215 (ABNT, 1996), foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (UEMG). Para realização do ensaio de compressão foi utilizada a máquina universal de ensaios da marca Forney (Figura 46), capacidade 125 toneladas, com controle de aplicação de força, e que atende aos requisitos da classe I da NBR NM ISO 7500-1.

Figura 46: Máquina universal marca Forney.



Fonte: Própria Autora (2019).

Após cura e preparo da superfície dos corpos de prova, procedeu-se a coleta das dimensões (altura e diâmetro) utilizando um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm.

Como o Laboratório de Materiais da Construção Civil da UEMG-Passos não disponibiliza de uma máquina para esmerilhar os corpos de prova, procedeu-se o capeamento com enxofre (Figura 47).

Figura 47: Corpos de prova capeados.



Fonte: Própria Autora (2019).

Antes de se iniciar o ensaio, o corpo de prova foi cuidadosamente centralizado no prato inferior, com auxílio dos círculos concêntricos de referência, observando-se o sentido de moldagem, de modo que seu eixo coincida com o da máquina, para que a resultante das forças seja devidamente centralizada.

Para cada composição foram utilizados 5 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. Os corpos de prova moldados foram ensaiados com idade de 7, 28 e 60 dias. Os resultados das resistências à compressão foram calculados conforme a Equação 3.

$$f_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (3)$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão, em Megapascals (MPa);

F é a força máxima alcançada, em Newtons (N);

D é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm).

3.6.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos de argamassa, com dimensões de 50 mm x 100 mm, foi determinada aos 28 dias. Conforme estabelecido pela NBR 7222 (ABNT, 2011), antecedeu ao ensaio a aferição das dimensões

das amostras com um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm e traçado em cada extremidade uma linha reta diametral.

Tal método consiste em comprimir um corpo de prova cilíndrico ao longo do plano axial, definido por geratrizes diametralmente opostas, coincidente com o eixo de aplicação de carga. Este ensaio é amplamente utilizado, visto que não necessita de grandes adaptações na prensa, e por utilizar as mesmas formas de corpos de prova de ensaios à compressão.

Os resultados das resistências à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos de argamassa foram calculados pela Equação 4.

$$f_{ct, sp} = \frac{2.F}{\pi.d.l} \quad (4)$$

Onde:

$f_{ct, sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral, em Megapascals (MPa);

F é a força máxima obtida no ensaio, em Newtons (N);

d é o diâmetro do corpo de prova, em milímetros (mm);

l é o comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm).

3.6.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado com o objetivo de avaliar a suscetibilidade das argamassas ao transporte de agentes agressivos.

Na idade de 28 dias, para cada traço foram utilizados 5 corpos de prova cilíndricos, medindo 5 cm de diâmetro e 10cm de altura, ao quais foram submetidos aos ensaios de massa específica da amostra seca (ρ_s), da absorção de água e do índice de vazios, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005). O ensaio consiste basicamente em determinar e registrar as massas da amostra nas condições, seca em estufa (M_s), imersa em água na balança hidrostática (M_i) e após a secagem da superfície com um pano úmido, massa saturada (M_{sat}).

Em síntese, após o tempo de cura, os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de 105 ± 5 °C durante 72h para a determinação da massa seca (M_s). Em seguida, os mesmos foram resfriados à temperatura ambiente e imersos em água por 72 h.

Saturados, afere-se a massa saturada superfície seca (M_{sat}) dos corpos de prova e a massa saturada imersa em água (M_i)

O valor da absorção (A) de água de cada corpo de prova, expresso em porcentagem, foi calculado pela Equação 5:

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

O valor do índice de vazios (I_v) de cada corpo de prova, expresso em porcentagem, foi calculado pela Equação 6:

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

O valor da massa específica (ρ_s) da amostra seca foi calculado pela Equação 7:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat}-M_i} \quad (7)$$

3.6.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade, assim como no ensaio de absorção de água por imersão, tem por finalidade, avaliar a suscetibilidade das argamassas produzidas com e sem RCV ao transporte de agentes agressivos.

O procedimento para determinação da absorção de água por capilaridade foi baseado nas recomendações da norma NBR 9779 (ABNT, 2012). A norma não fixa idades para realização do ensaio, dessa forma, após completado 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e colocados em estufa com capacidade de manter uma temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, durante o período de 72 h. Para cada composição foram utilizados 5 corpos de prova cilíndricos medindo 5 cm x 10 cm (diâmetro x altura).

Para garantir que a absorção de água ocorra unicamente pela base do corpo de prova, suas laterais foram impermeabilizadas com silicone e pesados para a determinação da massa seca (M_s) (Figura 48 - a)). Depois de registrada a massa seca, os corpos de prova foram transferidos para uma câmara climatizada com temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ para resfriamento e determinadas as suas massas.

Um recipiente com dimensões internas apropriadas para armazenar os corpos de prova, com suportes (grelhas metálicas) que os mantenham afastados do fundo e que permita um contato efetivo entre a face inferior do corpo de prova e a água também será instalado na câmara climatizada com temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, devidamente nivelado.

Em seguida deve-se posicionar os corpos de prova sobre os suportes, preenchendo-os com água, de modo que o nível da água permaneça constante a (5 ± 1) mm acima de sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies.

Figura 48: Corpos de prova utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade: a) impermeabilização da amostra, b) amostras em contato com lâmina d'água.



Fonte: Própria Autora (2019).

Durante o ensaio, determinou-se a massa dos corpos de prova com 3h, 6h, 9h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação deles em contato com a água, sendo que antes da determinação das massas, foram previamente enxugados com pano úmido. Após cada etapa de medição de massa, os corpos de prova retornaram imediatamente ao recipiente de ensaio.

A absorção de água por capilaridade foi calculada de acordo com a Equação 8.

$$C = \frac{M_A - M_S}{A} \quad (8)$$

Onde:

C é a absorção de água por capilaridade (g/cm^2).

M_A é a massa do corpo de prova no período de tempo (g).

M_S é a massa seca do corpo de prova (g).

A é a área da amostra em contato com a água (cm^2).

Ainda foi calculado a sortividade das argamassas conforme a Equação 9.

$$i = S \cdot t^{0,5} \quad (9)$$

Onde:

i é a absorção capilar por unidade de área (g/cm^2).

S é o coeficiente de sortividade ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-0,5}$).

t é tempo ($\text{min}^{0,5}$).

3.6.5 Microestrutura da matriz cimentícia

O emprego do microscópio eletrônico de varredura (MEV) permite evidenciar a morfologia dos compostos hidratados em função das condições de hidratação. As análises deste trabalho foram realizadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca FEI, modelo INSPECT S50 no LCE-DEMa-UFSCar.

Figura 49: Amostras de argamassas utilizadas no MEV.



Fonte: Própria Autora (2019).

O ensaio foi realizado na argamassa de referência e nas demais composições. O corpo de prova foi rompido com auxílio de um martelo e o fragmento colado no porta amostra com uma fita de carbono (Figura 49). Todas as amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro.

As imagens foram obtidas utilizando detector de elétrons secundários (SE) e de elétrons retroespalhados (BSED), em condições de tensão de aceleração de 25 kV e distância de trabalho (WD) de aproximadamente 10 mm. O espectroscópio de raios X (EDX) utilizado é da marca EDAX.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O planejamento experimental pretendeu enunciar as questões sobre os resultados de resistência à compressão dos corpos cilíndricos. A fim de avaliar afirmações sobre as médias de populações, empregou-se a técnica ANOVA (Analysis of Variance) para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de resistência à compressão e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente.

MODELO E ANÁLISE DE VARIÂNCIA

O interesse em testar se há diferenças entre as médias dos resultados de resistência à compressão das composições de argamassas, equivale a testar as hipóteses:

- Hipótese nula: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_I$ Elementos são iguais.
- Hipótese 01: $H_1: \mu_i \neq \mu_{i'}$, para pelo menos um par (i, i') , com $i \neq i'$ pelo menos um elemento difere dos demais.

em que:

$$\mu_i = \mu + \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

Se a hipótese nula, for verdadeira, todos os tratamentos terão uma média comum μ .

A análise de variância, baseia-se na decomposição da variação total da variável resposta em partes que podem ser atribuídas aos tratamentos (variância entre) e ao erro experimental (variância dentro).

A soma de quadrados foi organizada na tabela da análise de variância, como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Análise de variância.

| Causas de Variação | Graus de Liberdade | Soma de Quadrados | Quadrados Médios | F calculado |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| Tratamentos | I-1 | SQ Trat | QM Trat | QM Trat/QM Res |
| Resíduo | I(J-1) | SQ Res | QM Res | |
| Total | IJ-1 | SQ Total | | |

Fonte: FERREIRA, MANUEL, BELINE (2017).

Para testar a hipótese H_0 , utilizou-se o teste F. Considera-se válido se os pressupostos assumidos para os erros do modelo estiverem satisfeitos.

Se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$, rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao

nível α de significância escolhido. Caso contrário, aceita a hipótese de nulidade, ou seja, não há evidências de diferenças significativas entre os tratamentos.

- *Teste de comparação de médias*

Ao constatar a existência de diferença significativa entre tratamentos, por meio do teste F, usou-se o Teste de Scott e Knott e o Teste de Tukey para avaliar a magnitude destas diferenças.

Os resultados das médias foram comparados entre si pelo Teste de Scott e Knott e pelo o Teste de Tukey a 5% de probabilidade por meio do aplicativo computacional Genes. Essa porcentagem indica que são considerados diferentes os grupos cuja significância seja menor que este valor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais acerca da pesquisa. Estes são comparados com outros trabalhos e integrados entre si, para analisar a dependência das variáveis.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

As características físicas dos agregados, areia fina e areia média, comercializados no município de Passos-MG, estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Características físicas das areias.

| Características | Metodologia | Resultados | |
|--|-------------------------|------------|-------------|
| | | Areia Fina | Areia Média |
| Massa Específica (g/cm ³) | NBR 9776 (ABNT, 1987) | 2,645 | 2,631 |
| | NBR NM 52 (ABNT, 2009) | 2,602 | 2,603 |
| Massa Específica saturado superfície seca (g/cm ³) | NBR NM 52 (ABNT, 2009) | 2,479 | 2,496 |
| Massa Específica seca (g/cm ³) | | 2,403 | 2,429 |
| Massa Unitária seca (kg/m ³) | NBR NM 45 (ABNT, 2006) | 1411,99 | 1409,17 |
| Massa Unitária saturada superfície seca (kg/m ³) | | 1500,53 | 1483,29 |
| Índice de vazios (%) | NBR NM 30 (ABNT, 2001) | 38,93 | 37,55 |
| Absorção de água (%) | | 6,27 | 5,26 |
| Teor de umidade (5) | NBR NM 30 (ABNT, 2001) | 2,208 | 4,910 |
| Coefficiente de umidade | | 0,978 | 0,953 |
| Coefficiente de vazios | NBR NM 248 (ABNT, 2003) | 0,527 | 0,524 |
| Módulo de Finura | | 2,99 | 2,99 |
| Dimensão Máxima Característica | NBR NM 46 (ABNT, 2003) | 1,18 | 2,36 |
| Material pulverulento (%) | | 1,32 | 0,54 |

Fonte: Própria Autora (2019).

Os resultados de massa específica para ambas as normas, NBR 9776 (ABNT, 1987) e NBR NM 52 (ABNT, 2009), não apresentaram diferenças significativas. Sua determinação auxilia no cálculo do consumo de materiais e na determinação do peso próprio da estrutura.

O ensaio de massa unitária, realizado conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), estabelece a massa real do agregado, pois engloba todos os espaços existentes, os vazios. O fenômeno da massa unitária surge, porque não é possível empacotar as partículas dos agregados juntas, de tal forma que não haja espaços vazios. É através dela que se pode

transformar as composições de argamassa e concreto dadas em peso para o volume e vice-versa.

Os resultados de massa unitária solta para os agregados se deu pela média de três determinações, expressos na Tabela 9. De acordo com a classificação do agregado em relação à massa unitária, ambas as areias se classificaram como agregados normais.

Os resultados para o ensaio de absorção decorrem do processo pelo qual o líquido é conduzido e tende a ocupar os poros permeáveis do corpo sólido. Os valores referentes à absorção das amostras apresentaram-se coerentes ao estabelecido pela NBR NM 30 (ABNT, 2001), verificando que tal valor influenciou nas propriedades do agregado, e no aumento da resistência mecânica, pela consolidação das ligações inter granulares.

Com relação ao teor de umidade, que é o valor percentual relacionado à massa de água contida no agregado miúdo, observou-se uma discrepância entre os dados da areia fina para a areia média de 1,01%. Tal valor foi mensurado a fim de reduzir as variações de água na matriz cimentícia e descontado do total de água a ser adicionado ao concreto ou argamassa.

É importante o conhecimento da quantidade de material pulverulento, pois o excesso deste material prejudica a aderência entre a pasta de cimento e a argamassa, além de aumentar o consumo de água devido a maior superfície de contato, com consequente diminuição da resistência de concretos e argamassas. De acordo com a Tabela 9, os resultados foram satisfatórios para os agregados visto que a NBR 7211 (ABNT, 2009) limita os valores do teor de materiais pulverulentos até 1%.

4.1.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Os resultados das composições granulométricas dos agregados (areia fina e areia média, assim denominadas comercialmente) foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

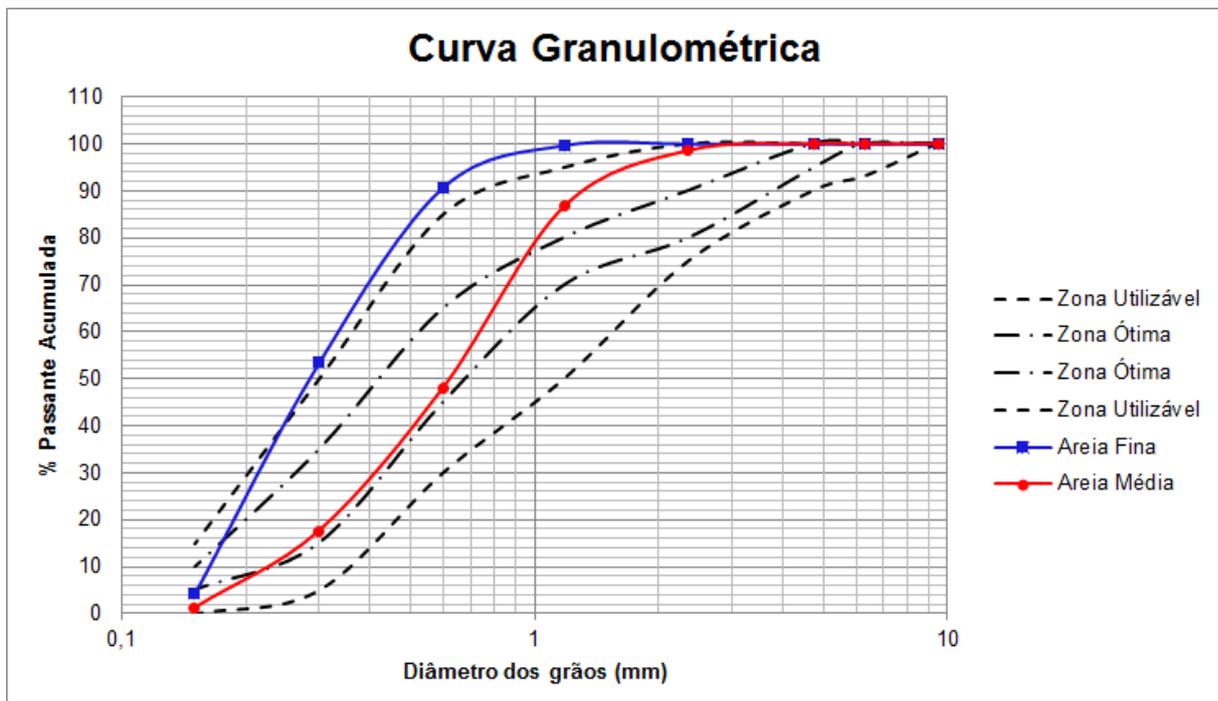
Além de estabelecer limites granulométricos para os agregados, a NBR 7211 (ABNT, 2009) também estabelece métodos para cálculo de dimensão máxima característica e composição granulométrica. A caracterização granulométrica dos agregados foi realizada segundo a NM 248 (ABNT, 2003). A Tabela 10 sintetiza os resultados da granulometria dos agregados, interpretados e apresentados no gráfico da Figura 50.

Tabela 10: Determinação da composição granulométrica pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

| Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) | Porcentagem, em massa, passante acumulada | | | | | |
|--|---|------------|--------------------|-----------------|------------|-------------|
| | Limites Inferiores | | Limites Superiores | | AREIA FINA | AREIA MÉDIA |
| | Zona Utilizável | Zona Ótima | Zona Ótima | Zona Utilizável | | |
| 9,5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 6,3 | 100 | 100 | 100 | 93 | 100 | 100 |
| 4,75 | 100 | 100 | 95 | 90 | 100 | 100 |
| 2,36 | 100 | 90 | 80 | 75 | 100 | 98,6 |
| 1,18 | 95 | 80 | 70 | 50 | 99,7 | 86,7 |
| 0,6 | 85 | 65 | 45 | 30 | 90,7 | 48,1 |
| 0,3 | 50 | 35 | 15 | 5 | 53,4 | 17,6 |
| 0,15 | 15 | 10 | 5 | 0 | 4,2 | 1,2 |

| | | | | |
|--------------------|-------------------|-------------|---------------------------------|----------------|
| AREIA FINA | Módulo de Finura: | 2,99 | Dimensão Máxima Característica: | 1,18 mm |
| AREIA MÉDIA | Módulo de Finura: | 2,99 | Dimensão Máxima Característica: | 2,36 mm |

Fonte: Própria Autora (2019).

Figura 50: Curva granulométrica dos agregados.

Fonte: Própria Autora (2019).

A areia média (denominada comercialmente) apresentou o resultado de 2,36 mm para dimensão máxima característica e módulo de finura de 2,48, classificada assim como agregado médio. A areia fina (denominada comercialmente) apresentou o resultado de 1,18 mm para dimensão máxima característica e do módulo de finura de 1,52, classificada como agregado fino. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), ambos os agregados são classificados na Zona Utilizável Superior, aceitável para uso em argamassas e concretos. Não se encaixando nesses limites somente nas malhas de 300µm, 600µm e de 1,18mm para a areia fina.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os agregados que não têm uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, em especial, produzem misturas cimentícias mais trabalháveis e econômicas. Partículas maiores tendem a produzir mais microfissuras na zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta de cimento.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL

4.2.1 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO

O resultado obtido no ensaio de pH, para a amostra de RCV foi de 7,90. A amostra pode ser considerada como resíduo não corrosivo, classe II – A, pois apresenta valores de pH dentro dos limites estipulados pela NBR 10004 (ABNT, 2004) ($2 < \text{pH} < 12,5$), dentro da faixa considerada como meio básico.

4.2.2 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

A reatividade dos resíduos de carvão vegetal (RCV) foi verificada pelo índice de atividade pozolânica (IAP) com o cimento Portland.

Os resultados obtidos no ensaio de IAP com o cimento Portland estão apresentados na Tabela 11. A amostra de argamassa com RCV não atingiu o índice de desempenho mínimo, em relação à argamassa de referência, necessário para que o RCV seja considerado um material pozolânico, de acordo com as especificações da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 11: Índice de atividade pozolânica com cimento Portland.

| Amostra | Resistência à compressão (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) | Índice de desempenho (%) |
|---------|--------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------|
| REF | 20,04 | 1,41 | 7,04 | — |
| RCV | 10,95 | 0,68 | 6,23 | 54,64 |

Fonte: Própria Autora (2019).

A amostra de argamassa com RCV apresentou índice de desempenho de 54,64%, ou seja, não atendeu ao índice mínimo, correspondente a 90% da resistência da argamassa de referência exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Em virtude dos resultados, a princípio o RCV não pode ser considerado como um material de substituição ao aglomerante, sendo assim, aplicado em substituição parcial (em volume) ao agregado miúdo natural (areia fina) na produção de argamassas, entretanto, ressalvasse que o mesmo foi utilizado sem beneficiamento. O processamento de finos de

carvão deve ser estudado maior cautela para avaliar seu emprego em substituição ao cimento. Em relação à substituição como agregado, o RCV se mostrou eficiente, conforme será detalhado a seguir.

4.2.3 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

A composição química das amostras de RCV utilizadas nessa pesquisa podem ser verificadas na Tabela 12. Vale salientar, novamente, que os resíduos de carvão vegetal são originários da carbonização da lenha de eucalipto.

Tabela 12: Composição química do RCV.

| Análise Quantitativa | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|--------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|
| Constituintes | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | SO ₃ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | MnO | Fe ₂ O ₃ |
| Resultado (%) | 0,85 | 2,46 | 3,90 | 2,63 | 27,27 | 45,08 | 1,15 | 0,03 | 8,02 | 8,62 |

Fonte: Própria Autora (2019).

A análise de fluorescência da amostra revelou que o RCV é composto por sílica (3,90%), alumina (2,46%) e hematita (8,62%), entretanto, não atende aos requisitos de classificação de material pozolânico conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014). A norma preconiza o valor mínimo necessário de 50% para o somatório dos percentuais de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ para considerar um material como pozolânico, exigência que não foi alcançada.

Apesar do teor de SO₃ ser inferior ao preconizado pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014), abaixo de 4%, observou-se também a expressiva quantidade de álcalis presentes no RCV, os quais se distribuem da seguinte forma: em maior quantidade de óxido de cálcio (45,08%), óxido de potássio (27,27%) e óxido de magnésio (0,85%).

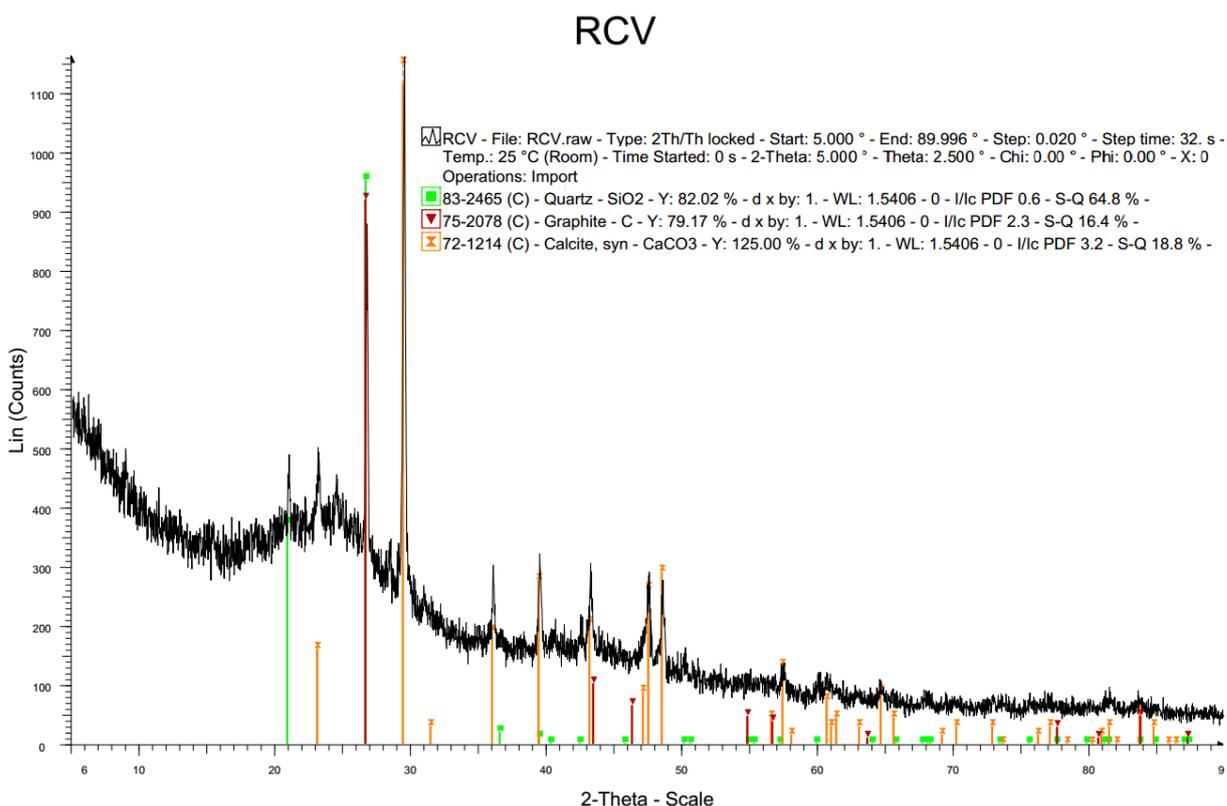
Para Lima e Rossignolo (2009), os álcalis podem prejudicar o desempenho das propriedades do concreto, com destaque para a redução do pH, despassivação da armadura e reações expansivas. Vale salientar que a composição química do RCV pode variar em função do tipo de eucalipto cultivado, dos fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais, tais como clima, solo e água (SAMPAIO, SOUZA, GOUVEIA, 2014).

4.2.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)

O ensaio de difração de raios-X foi realizado com o intuito de identificar as fases cristalinas existentes no RCV. Pode-se verificar no difratograma da Figura 51 pico característico de quartzo (SiO₂) de elevada intensidade, identificado no ângulo 27° 2θ,

evidenciando-o como mineral predominante na composição do RCV, tipicamente produzido durante o processo de carbonização da biomassa. Também foram identificados pico característico de calcita (CaCO_3) identificado no ângulo $29^\circ 2\Theta$, proveniente da madeira utilizada na queima e pico característico de grafite (C), mas de baixa intensidade, identificado no ângulo $27^\circ 2\Theta$.

Figura 51: Difratograma da amostra de RCV.



Fonte: Própria Autora (2019).

A existência de picos bem definidos e a ausência de halo amorfo caracterizam a amostra de RCV com elevado grau de cristalinidade, apesar do mesmo apresentar uma banda amorfa entre os ângulos 20° e $30^\circ 2\Theta$. Tais resultados corroboram com os apresentados por Martins et al. (2007) na difratometria do carvão de serragem de eucalipto.

Na análise quantitativa das fases cristalinas identificou-se que a amostra de RCV é composta por 64,8% de quartzo, 18,8% de calcita e 16,4% de grafite. O gráfico obtido por meio do ensaio de DRX demonstrou que o RCV possui baixa reatividade devido à grande quantidade de picos cristalinos.

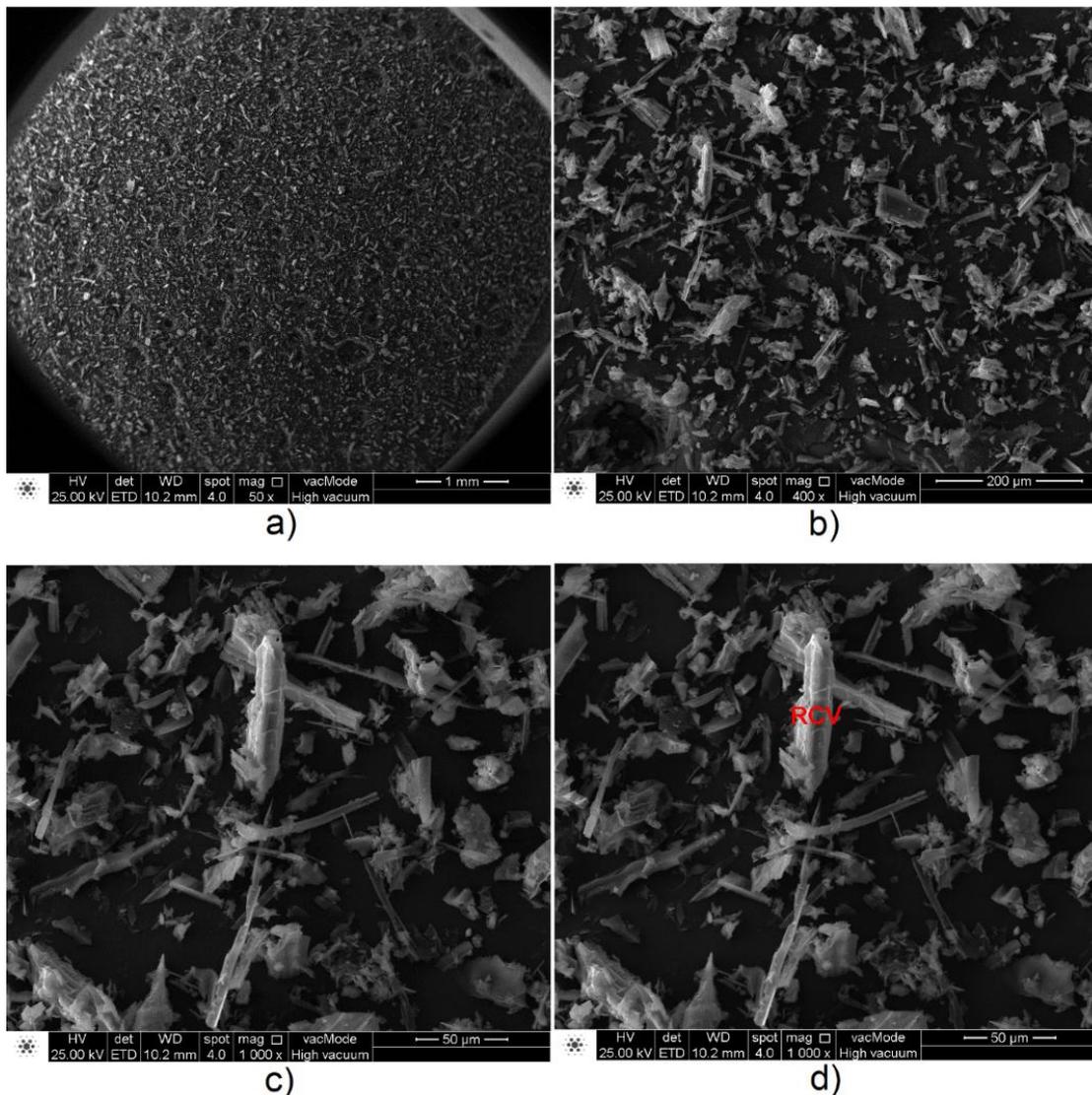
A calcita confirma a presença do óxido de cálcio obtido pelo ensaio de fluorescência, assim como o quartzo confirma a presença de silicatos na amostra de RCV.

4.2.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COM MICROANÁLISE EDS

Na amostra de RCV selecionada, foi realizado o ensaio de microscopia eletrônica de varredura e microanálise EDS. O RCV é composto com dimensões de partículas variadas, em maior concentração de grão angulares e aciculares, possuem aspecto lamelar (Figura 52).

Diferente de outros materiais utilizados como adições minerais, que possuem formato esférico, a característica lamelar do RCV tende a diminuir a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco e aumentar o consumo de água. Tal fato foi observado por esta pesquisa ao longo das análises laboratoriais.

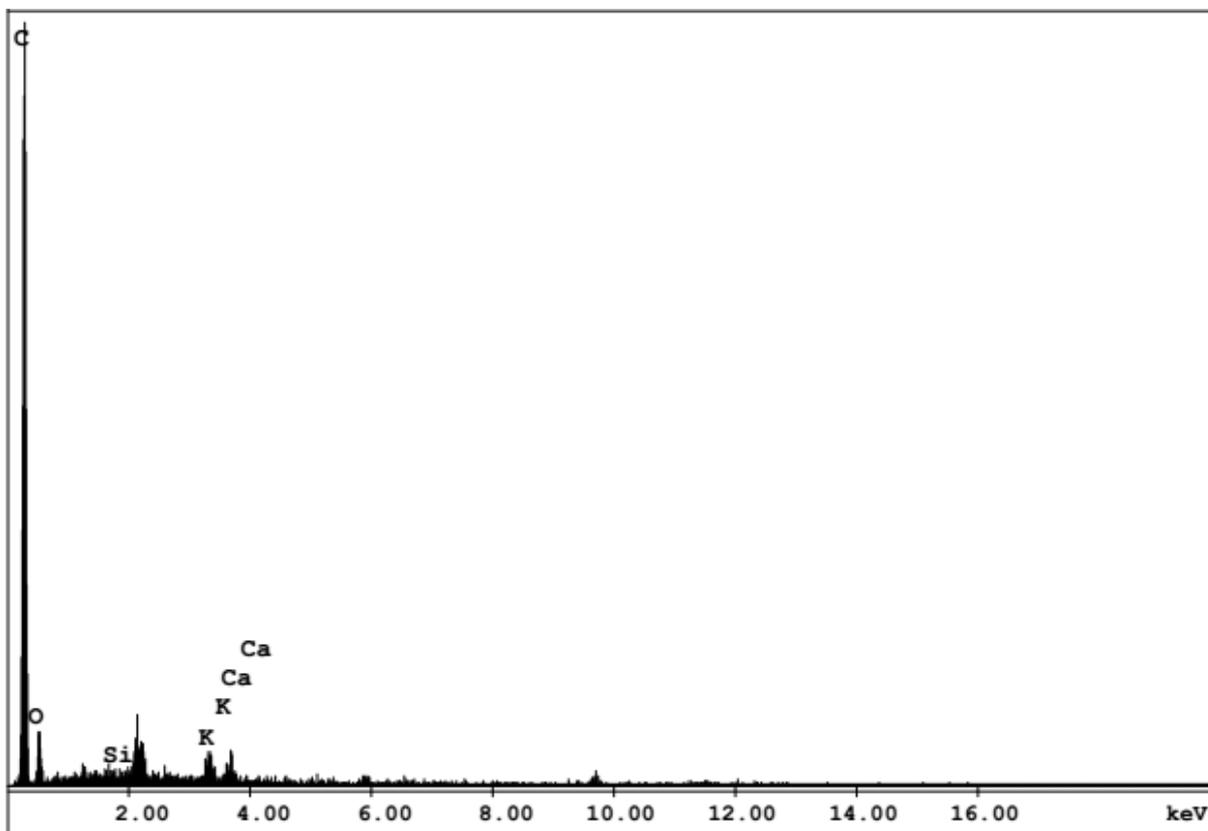
Figura 52: Micrografia do RCV: a) mag 50x; b) mag 400x; c) e d) mag 1000x.



Fonte: Própria Autora (2019).

Por meio da imagem obtida no MEV e microanálise EDS, foi possível identificar os elementos dos resíduos de carvão vegetal (Figura 53). Os resultados obtidos na microanálise EDS corroboram com os resultados de fluorescência de raios-X, sendo que ambos identificaram traços de carbono, silício, cálcio e potássio.

Figura 53: Microanálise EDS do RCV.



Fonte: Própria Autora (2019).

4.2.6 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL

Os resultados da composição granulométrica dos resíduos de carvão vegetal realizado segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) estão apresentados a seguir na Tabela 13 e no gráfico da Figura 54. Por se tratar de um material que seria descartado, sem padrão, irregular, este ensaio consiste na caracterização do material encontrado in loco, sem que qualquer tipo de beneficiamento tenha sido realizado anteriormente.

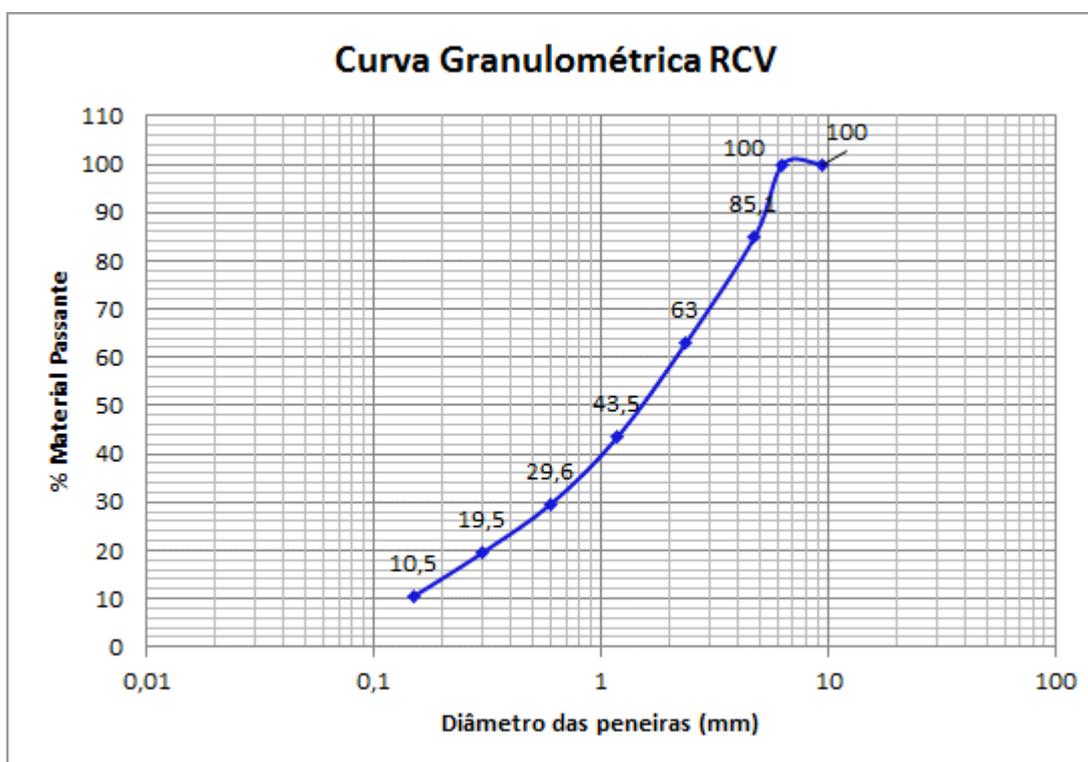
Pelos resultados obtidos, temos como diâmetro máximo característico dos RCV 4,75 mm e de acordo com o módulo de finura, trata-se de um material dentro da zona utilizável superior, conforme classificação da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 13: Composição granulométrica do RCV.

| PENEIRA (mm) | MASSA RETIDA (g) | % RETIDA | % ACUMULADA | % PASSANTE |
|--|------------------|---------------|-------------|------------|
| 9,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 6,3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 4,75 | 44,60 | 14,87 | 14,87 | 85,10 |
| 2,36 | 66,50 | 22,17 | 37,04 | 63,00 |
| 1,18 | 58,40 | 19,47 | 56,51 | 43,50 |
| 0,6 | 41,70 | 13,90 | 70,41 | 29,60 |
| 0,3 | 30,30 | 10,10 | 80,51 | 19,50 |
| 0,15 | 27,80 | 9,26 | 89,77 | 10,50 |
| Fundo | 30,70 | 10,23 | 100,00 | 0,30 |
| TOTAL | 300,00 | 100,00 | | |
| Diâmetro Máximo Característico (mm) | | | 4,75 | |
| Módulo de Finura | | | 3,49 | |

Fonte: Própria Autora (2019).

Figura 54: Análise granulométrica dos resíduos de carvão vegetal.



Fonte: Própria Autora (2019).

4.2.7 MASSA ESPECÍFICA DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL

A execução desse ensaio se deve à importância de se determinar o volume ocupado pelas partículas no estudo de dosagem.

A amostra em ensaio foi constituída de partículas passantes na peneira com abertura de malha 150 μm . A norma NBR 16605 (ABNT, 2017) apresenta uma nota referente à massa de 60g de cimento para realização do ensaio, entretanto para os resíduos pulverulentos de carvão vegetal a massa de 30 g foi satisfatória na efetivação do ensaio.

Tabela 14: Massa Específica RCV.

| Cimento Portland e outros materiais em pó | | |
|---|---------------------------|---|
| Determinação da massa específica - NBR 16605 (ABNT, 2017) | | |
| m (g) | V (cm³) | γ (g/cm³) |
| 30 | 21 | 1,42857 |

Fonte: Própria Autora (2019).

O resultado referente à análise da massa específica dos resíduos pulverulentos de carvão vegetal foi de 1,42857g/cm³, similar ao resultado apresentado por Ramos (2015). Observou-se que se trata de um material pouco denso.

4.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

4.3.1 Índice de Consistência

Na confecção dos corpos de prova de argamassa o traço foi executado conforme proposto, sem alteração, entretanto pode-se observar que à medida que se aumentava o teor de substituição do RCV, a mistura adquiria uma coloração mais escura e uma queda na trabalhabilidade.

Conforme apresentado na Tabela 15, pode-se constatar que as argamassas de 10% RCV, 20% RCV e 30% RCV apresentaram um decréscimo no índice de consistência de 12,82%, 20,83% e 30,45% respectivamente, em relação à argamassa de referência (0% RCV).

Tabela 15: índice de consistência das composições de argamassa.

| Composições | Proporção dos materiais | | | | | Índice de consistência (mm) |
|-------------|-------------------------|------|------------|-------------|------|-----------------------------|
| | Cimento | RCV | Areia Fina | Areia Média | a/c | |
| 0% RCV | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,55 | 312 |
| 10% RCV | 1,00 | 0,10 | 0,90 | 1,00 | 0,55 | 272 |
| 20% RCV | 1,00 | 0,20 | 0,80 | 1,00 | 0,55 | 247 |
| 30% RCV | 1,00 | 0,30 | 0,70 | 1,00 | 0,55 | 217 |

Fonte: Própria Autora (2019).

Segundo Sampaio (2013), a queda da trabalhabilidade é causada pela combustão incompleta do material, que contém altos teores de matéria orgânica e por sua alta

porosidade. A queima dos materiais em temperaturas não controladas faz com que estes absorvam mais água, contribuindo conseqüentemente para uma argamassa mais seca e menos trabalhável. Outra análise diz respeito ao baixo teor de sílica do RCV somado à perda de trabalhabilidade no estado fresco das argamassas.

4.3.2 Resistência à Compressão

Os resultados médios de resistência à compressão das argamassas nas idades de 7, 28 e 60 dias estão apresentados na Tabela 16. No anexo B estão apresentados os dados individuais de resistência à compressão para cada amostra utilizada.

Na idade de 7 dias, a argamassa 20% RCV apresentou um aumento de resistência à compressão de 7,92% em relação à argamassa de referência (0% RCV). Por outro lado, os traços 10% RCV e 30% RCV apresentaram redução de 19,8% e 5,94%, respectivamente, também em relação à argamassa de referência.

Tabela 16: Resultado do ensaio de resistência à compressão aos 7, 28 e 60 dias.

| | | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | | | |
|---------|-------------|--------------------------|----------|----------|----------|
| | | 0 % RCV | 10 % RCV | 20 % RCV | 30 % RCV |
| 7 dias | Média (MPa) | 25,732 | 20,637 | 27,771 | 24,204 |
| | DP (MPa) | 3,041 | 3,968 | 1,065 | 2,014 |
| | CV (%) | 11,819 | 19,227 | 3,836 | 8,322 |
| 28 dias | Média (MPa) | 27,520 | 27,007 | 28,127 | 27,007 |
| | DP (MPa) | 1,452 | 1,661 | 0,929 | 1,661 |
| | CV (%) | 5,276 | 6,150 | 3,303 | 6,150 |
| 60 dias | Média (MPa) | 28,180 | 27,108 | 30,622 | 26,546 |
| | DP (MPa) | 1,12 | 3,34 | 3,09 | 1,82 |
| | CV (%) | 3,97 | 12,33 | 10,11 | 6,84 |

Fonte: Própria Autora (2019).

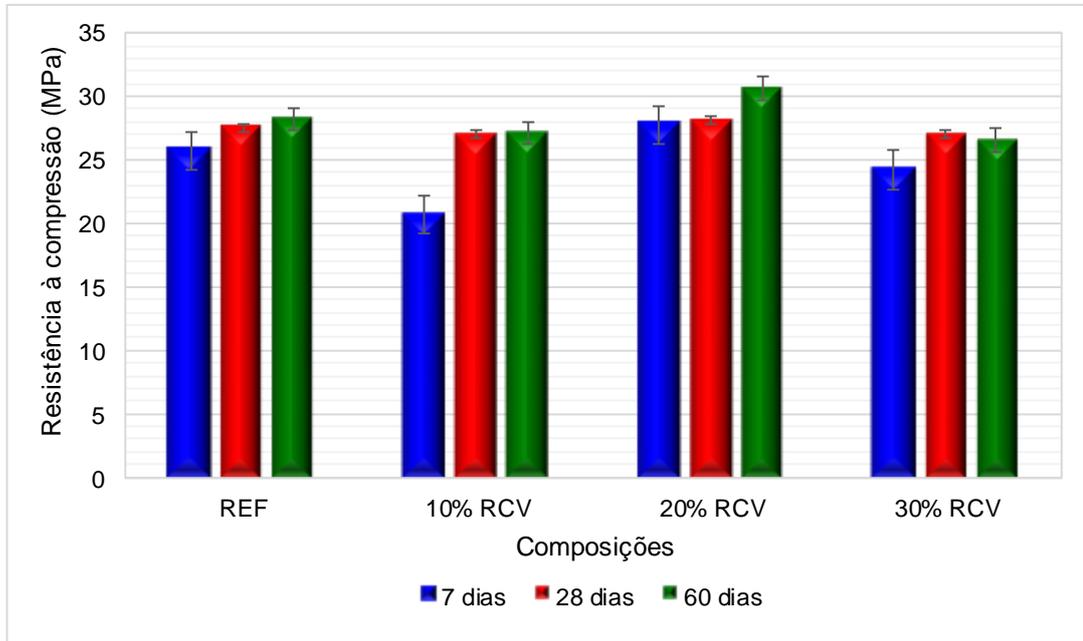
Na idade de 28 dias, todos os traços elevaram os valores de resistência à compressão, entretanto, a argamassa de 20% RCV apresentou um aumento de 2,21% em relação à argamassa de referência e os traços com 10% RCV e 30% RCV redução de 1,86% para ambos.

Aos 60 dias de idade, os resultados de resistência à compressão das argamassas com 10% RCV e 30% RCV foram similares à argamassa de referência, com exceção da composição de 20% RCV, que apresentou um aumento de 8,66% em relação à referência.

Com intervalo de cura maior, destacou-se o avanço das reações de hidratação dos componentes do cimento. O aumento da resistência à compressão não obteve uma evolução tão significativa pelo fato dos RCV não se apresentarem como material pozolânico, demonstrando uma reação de hidratação mais rápida aos 7 dias e mais lenta ao passar do

tempo, contando principalmente com a hidratação dos silicatos de cálcio hidratados (CSH), que se hidrataram e deram resistência à matriz cimentícia.

Figura 55: Resistência à compressão das argamassas aos 7, 28 e 60 dias.

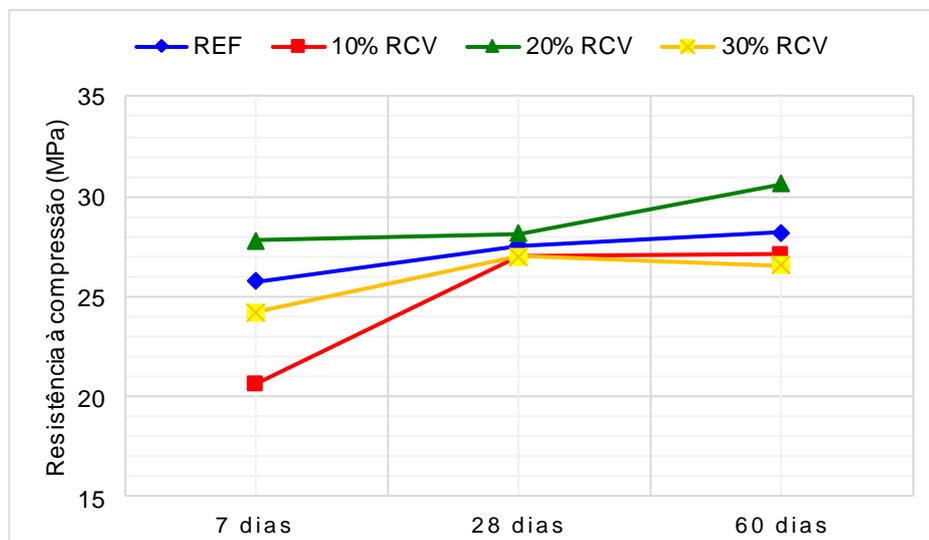


Fonte: Própria Autora (2019).

Considerando que os valores de resistência mecânica para todas as composições estavam acima de 20 MPa, tal produto pode ser incorporado em placas de concreto, blocos de pavimentação, lajes e demais elementos que não exijam resistências tão elevadas.

Na Figura 56, é apresentada a evolução das resistências à compressão em função da idade das argamassas com substituição da areia fina pelo RCV.

Figura 56: Correlações para a resistência à compressão das argamassas.



Fonte: Própria Autora (2019).

Ao correlacionar os resultados de resistência à compressão das amostras, nota-se que a reta para a argamassa de referência (0% RCV) e para as argamassas com substituições apresentam inclinações semelhantes, ou seja, as retas seguem a mesma tendência, indicando que possuem comportamentos semelhantes em relação ao ganho de resistência em função da idade.

No gráfico de resistência em função da idade, observa-se que as retas das argamassas sem e com RCV, tendem a coincidir entre si aos 28 dias. Já a argamassa com 30% RCV, apesar de apresentar comportamento no aumento de resistência à compressão parecido, apresentou valores inferiores em relação aos demais.

Ramos (2015) produziu argamassas com teores de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 30% de RCV em substituição em volume da areia, o pesquisador concluiu que o uso de RCV como agregado leve é viável para fabricação de componentes não estruturais. Mota et al. (2017) produziram concretos com teores de 2%, 4% e 8% de RCV em substituição à massa do agregado miúdo, os pesquisadores concluíram que a adição de resíduos de carvão contribui com as propriedades mecânicas dos concretos.

Ainda que o RCV não tenha contribuído significativamente para o efeito pozolânico e para o ganho de resistência, ainda que tardio, pode-se verificar que a incorporação de resíduos de carvão vegetal, desde que nos teores adequados, contribui com o aproveitamento de um material que seria descartado inadequadamente e com a diminuição de materiais não renováveis empregados às argamassas, mantendo suas propriedades mecânicas.

4.3.3 Análise de Variância

A Análise de Variância (ANOVA) foi utilizada com o intuito de comparar se há diferença significativa entre os resultados de resistência à compressão para as diferentes combinações, denominada estatisticamente como tratamentos.

Nesse estudo, a variável analisada foi a resistência à compressão, as subparcelas são os traços de argamassa, totalizando em quatro, a argamassa de referência (0% RCV) e as argamassas com adição de resíduos de carvão vegetal (10% RCV, 20% RCV e 30% RCV), as parcelas refere-se ao tempo de cura, 7, 28 e 60 dias, totalizando em três e as repetições, ao número de exemplares confeccionados para cada traço, contabilizados em 5 exemplares.

Os resultados da análise de variância da variável, resistência à compressão, efetuada pelo software GENES, está apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Análise de variância da variável resistência à compressão.

| FV | GL | SQ | QM | F |
|------------|----|----------|---------|---------|
| Parcela | 2 | 139,6120 | 69,806 | 11,3416 |
| Erro a | 12 | 73,8585 | 6,1548 | |
| Subparcela | 3 | 128,4853 | 42,8284 | 8,4696 |
| Interação | 6 | 60,5900 | 10,0983 | 1,9970 |
| Erro b | 36 | 182,0425 | 5,0567 | |

Fonte: Próprio Autor (2019).

Os valores de interesse nesse estudo são os valores de Fisher (F), os quais permitem testar as hipóteses H_0 e H_1 . O resultado do teste de hipótese encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18: Teste de Hipótese.

| FV | TESTE | GL NUM | GL DEN | F | PROBABILIDADE (%) |
|------------|------------|--------|--------|---------|-------------------|
| Parcela | QMP/QMEa | 2 | 12 | 11,3416 | 0,001716** |
| Subparcela | QMS/QMEb | 3 | 36 | 8,4696 | 0,021498** |
| Interação | QMPxS/QMEb | 6 | 36 | 1,9970 | 9,176706 ns |

Fonte: Próprio Autor (2019).

De acordo com o teste, foi encontrada a seguinte situação: para as parcelas, ou seja, os dias de cura, 7, 28 e 60 dias, obteve-se o valor de F igual a 11,34; para as subparcelas, ou seja, os traços de argamassa, 0% RCV, 10% RCV, 20% RCV e 30% RCV, obteve-se o valor de F igual a 8,47. Pode-se verificar por meio da tabela de distribuição F que o resultado para ambos foi significativo a 1%, ou seja, a probabilidade ao nível de 5% foi significativa. Concluiu-se que há 99% de certeza de que, pelo menos, um dos valores difere dos demais, tanto para as parcelas como para as subparcelas.

A probabilidade da interação foi de 9,18%, ou seja, acima de 5%, portanto, não há diferença significativa estatisticamente, ou seja, todos os resultados entre eles foram entendidos como similares. Em síntese, para os dias de cura, os resultados de resistência à compressão para as combinações de argamassa foram semelhantes.

Pode-se afirmar que o RCV teve efeito significativo na resistência à compressão, assim como o aumento da idade, ou seja, observou-se um aumento de resistência ao longo do tempo. Contudo, analisando-se a influência combinada do RCV na resistência à compressão com a idade, não houve efeito significativo no crescimento da resistência.

Diante dos resultados, não houve necessidade de realizar o teste de comparação de médias para interação parcelas/subparcelas. O teste de média foi realizado somente para as

parcelas e para as subparcelas. Os testes empregados foram o de Scott-Knott e o de Tukey. A escolha por realizar ambos, se deu a fim de verificar se há divergência entre os resultados.

Tabela 19: Teste de comparação de médias das parcelas.

| Tratamento | SCOTT E KNOTT | | TUKEY | |
|--------------|---------------|-------|---------|-------|
| | Média | Grupo | Média | Grupo |
| cura 60 dias | 28,1140 | a | 28,1140 | a |
| cura 28 dias | 27,4152 | a | 27,4152 | a |
| cura 7 dias | 24,5858 | b | 24,5858 | b |

Fonte: Própria Autora (2019).

Na comparação de médias para as parcelas, conforme Tabela 19, obteve-se como resultado, em ambos os testes, grupo “a” para cura aos 28 e 60 dias, e grupo “b” para cura aos 7 dias, ou seja, estatisticamente, os resultados de resistência à compressão para os exemplares com cura aos 28 e 60 dias foram iguais, enquanto que aos 7 dias foi inferior, diferindo dos demais.

Tabela 20: Teste de comparação de médias das subparcelas.

| Tratamento | SCOTT E KNOTT | | TUKEY | |
|------------|---------------|-------|---------|-------|
| | Média | Grupo | Média | Grupo |
| 20% RCV | 28,8400 | a | 28,8400 | a |
| 0% RCV | 27,1441 | b | 27,1441 | ab |
| 30% RCV | 25,9187 | c | 25,9187 | bc |
| 10% RCV | 24,9171 | c | 24,9171 | c |

Fonte: Própria Autora (2019).

Na comparação de médias para as subparcelas, conforme Tabela 20, a argamassa com adição de 20% RCV obteve maior resistência à compressão, seguido das argamassas de 0% RCV, 30% RCV e 10% RCV.

De acordo com a classificação de grupo, no teste de Scott e Knott, somente as subparcelas de 10% RCV e 30% RCV são consideradas similares estatisticamente, grupo “c”. As subparcelas de 20% RCV e 0% RCV obtiveram como resultado grupo “a” e grupo “b”, respectivamente, diferindo das demais.

No teste de Tukey observa-se uma ambiguidade nos resultados. Enquadra-se no grupo “a” as subparcelas de 20% RCV e 0% RCV, no grupo “b” as subparcelas 0% RCV e 30% RCV, e no grupo “c” as subparcelas de 30% RCV e 10% RCV. Estatisticamente as subparcelas de mesmo grupo são similares, entretanto, pode-se observar que a combinação de 20% RCV difere das argamassas com 10% RCV e 30% RCV, e as de 0% RCV difere das de 10% RCV.

Na Tabela 21 encontram-se os indicadores de qualidade e confiabilidade do experimento.

Tabela 21: Indicadores da análise de variância.

| Indicador | Valor |
|---|--------------|
| Média da variável (MPa) | 26,7 |
| Coefficiente de variação - Parcela (%) | 9,29 |
| Coefficiente de variação - Subparcela (%) | 8,42 |

Fonte: Própria Autora (2019).

De acordo com a análise de variância realizada a média de resistência à compressão do experimento foi de 26,7 MPa. O coeficiente de variação da parcela e da subparcela obtiveram resultados inferiores a 10%. Tais resultados são considerados relativamente baixos, portanto, simboliza uma alta viabilidade técnica para o experimento em estudo.

4.3.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Obedecendo a idade de 28 dias para execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, obteve-se a média dos resultados, apresentado na Tabela 22.

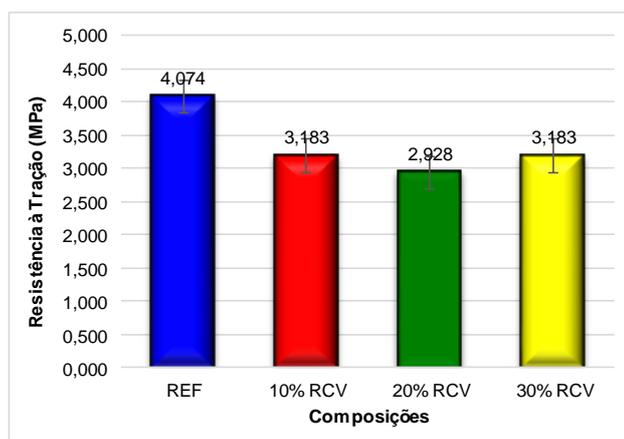
Tabela 22: Resultado da resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

| TRAÇOS | Média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) |
|---------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| REF | 4,074 | 0,760 | 18,65 |
| 10% RCV | 3,183 | 0,872 | 27,39 |
| 20% RCV | 2,928 | 0,523 | 17,86 |
| 30% RCV | 3,183 | 0,872 | 25,50 |

Fonte: Própria Autora (2019).

Os dados apresentados na Tabela 22, são descritos no gráfico da Figura 57:

Figura 57: Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.



Fonte: Própria Autora (2019).

No quesito que tange à resistência à tração por compressão diametral, os resultados constatarem decréscimo de resistência para todas as amostras em relação à amostra de referência (0% RCV). As amostras de 10% RCV, 20% RCV e 30% RCV, apresentaram redução de 21,87% e 28,13% e 21,87% respectivamente.

Apesar das argamassas com adições de RCV apresentarem um decréscimo de resistência à tração em relação à argamassa de referência, tais resultados concordam com pesquisas realizadas com a incorporação de resíduos agroindustriais, tais como, fibras vegetais e resíduos de combustão de madeira de Eucalipto e de Pinus.

Lima e Iwakiri (2010) constatarem resistência à tração em torno de 2,62 MPa para incorporação de resíduos de madeira de Pinus em compósitos cimentícios. Nascimento et al. (2016) obtiveram valores em torno de 3,60 MPa para adição de cinza de Algaroba em concretos, e Oliveira, Gouveia e Teixeira (2014) constatarem resistências à tração de 2,95 MPa para concretos com adição de fibras vegetais. Em uma análise geral, pode-se constatar existe a viabilidade técnica no quesito resistência à tração referente à incorporação de RCV em matrizes cimentícias.

4.3.5 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizados na idade de 28 dias. Os resultados podem ser verificados na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias.

| TRAÇOS | Absorção de água por imersão | | | Índice de vazios | | | Massa Específica | | |
|----------------|------------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|----------------------------|-------------------------|--------|
| | MÉDIA (%) | DP (%) | CV (%) | MÉDIA (%) | DP (%) | CV (%) | MÉDIA (g/cm ³) | DP (Kg/m ³) | CV (%) |
| 0% RCV | 12,84 | 0,27 | 2,12 | 23,92 | 0,36 | 1,50 | 1,86 | 0,02 | 0,93 |
| 10% RCV | 13,57 | 0,34 | 2,47 | 25,18 | 0,48 | 1,92 | 1,86 | 0,01 | 0,57 |
| 20% RCV | 14,76 | 0,45 | 3,08 | 26,71 | 0,67 | 2,50 | 1,81 | 0,01 | 0,65 |
| 30% RCV | 16,12 | 0,36 | 2,24 | 28,21 | 0,46 | 1,62 | 1,75 | 0,01 | 0,63 |

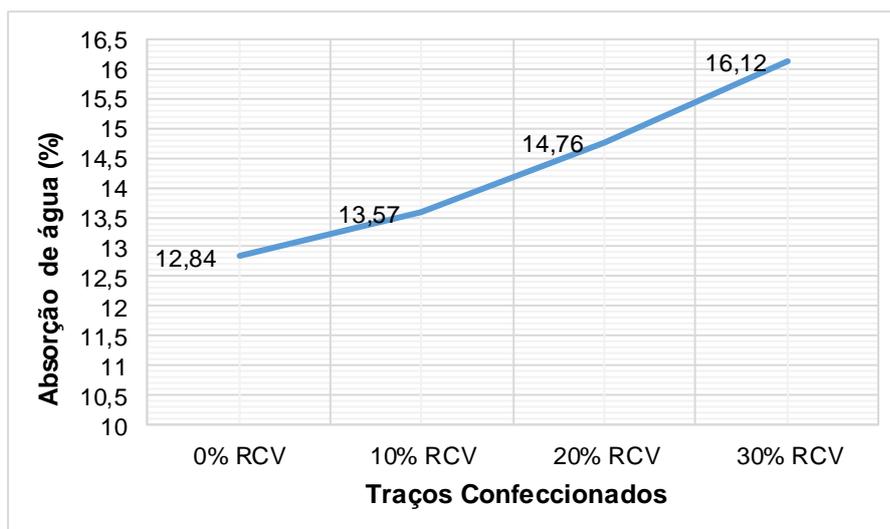
Fonte: Própria Autora (2019).

Conforme Figura 58, observou-se diferença nos resultados de absorção de água e índice de vazios entre os traços. As argamassas de 10% RCV, 20% RCV e 30% RCV apresentaram um aumento de absorção de água de 5,69%, 14,95% e 25,54%, respectivamente, em relação à argamassa de referência (0% RCV). O índice de vazios das argamassas de 10% RCV, 20% RCV e 30% RCV apresentaram um aumento de 5,26%,

11,66% e 17,93%, respectivamente, em relação à argamassa de referência, ou seja, o incremento no teor de RCV interferiu na porosidade das argamassas.

Considerando os desvios padrões de absorção e índice de vazios, foi possível notar uma variação insignificante, ou seja, a porosidade não foi um fator determinante em ganhos ou perdas de resistência à compressão dos corpos de prova com substituição da areia fina por RCV.

Figura 58: Absorção de água aos 28 dias.

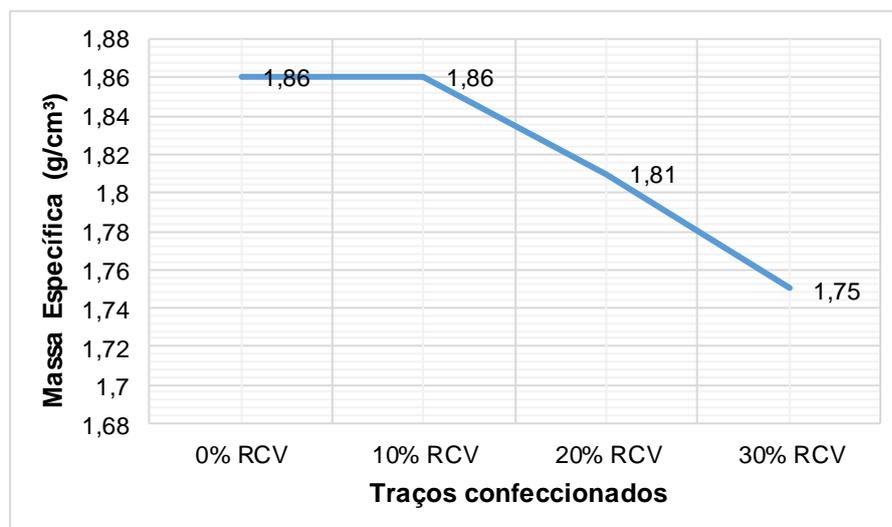


Fonte: Próprio Autor (2019).

Analisando a absorção de água das argamassas em função do teor de substituição de 20% RCV, nota-se que os valores foram maiores em relação à argamassa de referência, apesar de a de substituição ser mais resistente. Esse fato pode ser explicado a partir da análise da microestrutura dos poros dessas argamassas.

Como a porosidade total das misturas com teor de 20% RCV é maior, sugere-se, que elas possuem uma maior quantidade de poros menores, não impactando negativamente na resistência. Já as misturas de referência (0% RCV) e de 10% RCV, possuem porosidade total menor, mas sugere-se que possuem maior volume de poros de dimensão maior, impactando negativamente a resistência.

Em relação à massa específica, verifica-se, conforme Figura 59, que houve uma diminuição nos resultados das argamassas com incorporação de RCV. Tal resultado justifica o aumento do volume de vazios. As argamassas estudadas neste trabalho caracterizam-se como de massa específica leve, portadoras de valores inferiores a 2000 kg/m³.

Figura 59: Massa Específica aos 28 dias.

Fonte: Própria Autora (2019).

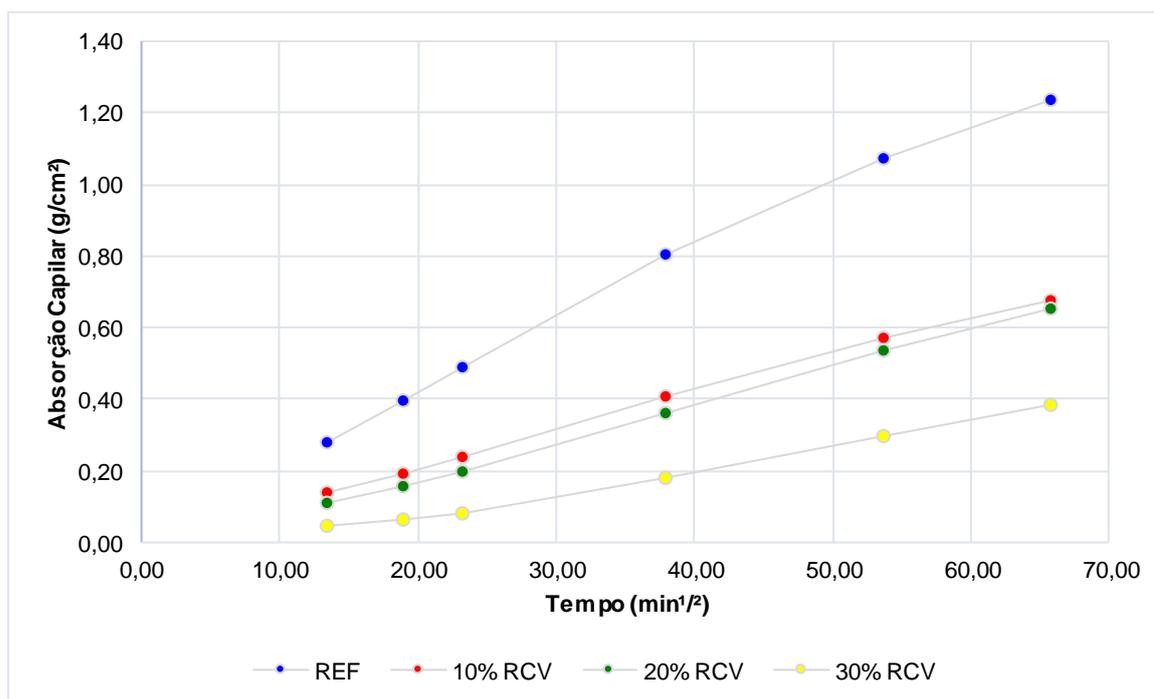
Segundo Lima e Iwakiri (2012), a redução da massa específica é uma das vantagens do emprego de resíduos em matrizes cimentícias, o que permite sua utilização na produção de painéis de fechamento, forros, telhas, elementos de vedação e de alvenaria.

No Apêndice A estão apresentados os dados utilizados para a determinação dos resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica para cada amostra utilizada.

4.3.6 Absorção de água por capilaridade

Os resultados no ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas na idade de 28 dias, verificados na Figura 60, apresentaram uma boa correlação com o tempo^{1/2}, com isso foi possível obter a sortividade do material (Figura 61), que corresponde ao coeficiente angular da reta, já os resultados de absorção de água por capilaridade, durante o ensaio, de cada amostra estão apresentados no Apêndice C.

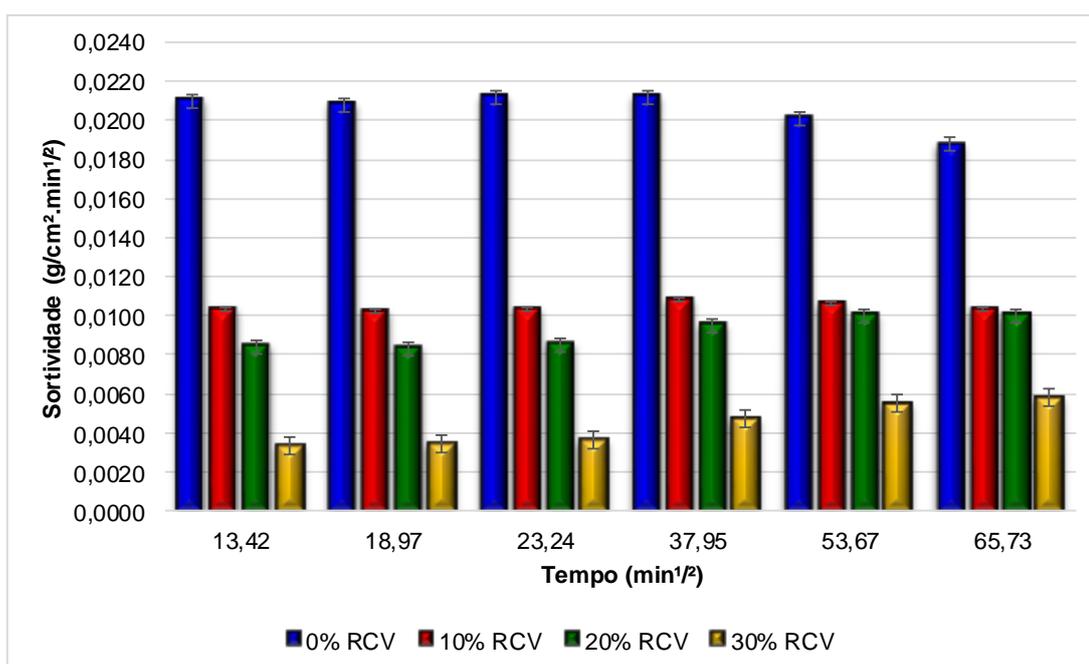
Figura 60: Absorção capilar das argamassas.



Fonte: Própria Autora (2019).

Todas as combinações de argamassas apresentaram resultados de absorção de água por capilaridade inferiores à de referência. Aos 28 dias de idade, os traços apresentaram redução no coeficiente de sortividade em relação à referência, essa redução foi de 49%, 55% e 78% para as argamassas de 10% RCV, 20% RCV e 30% RCV, respectivamente.

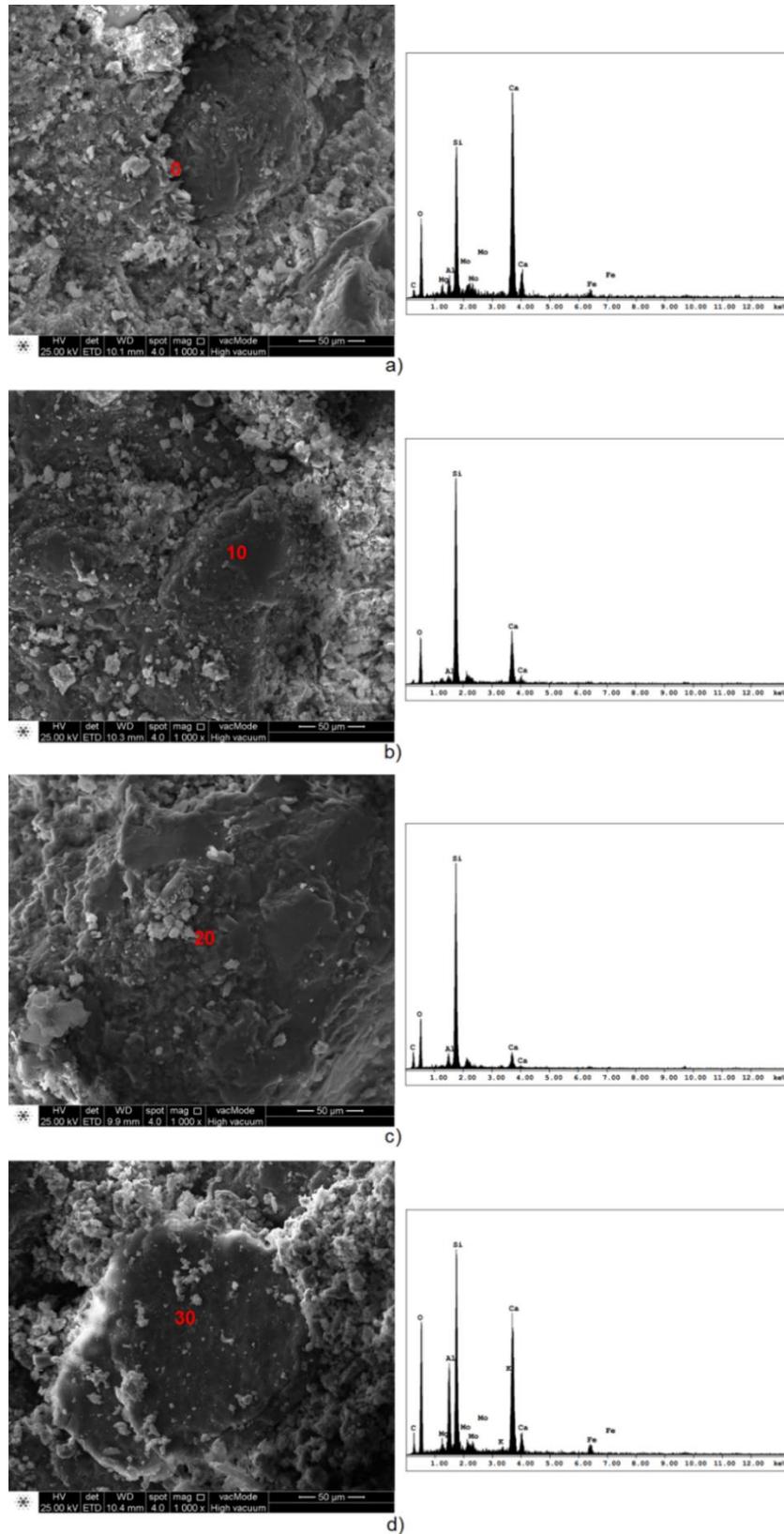
Figura 61: Sortividade das argamassas.



Fonte: Própria Autora (2019).

4.3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Figura 62: MEV com EDS, mag 1000x: a) 0%RCV, b) 10%RCV, c) 20%RCV, d) 30%RCV.



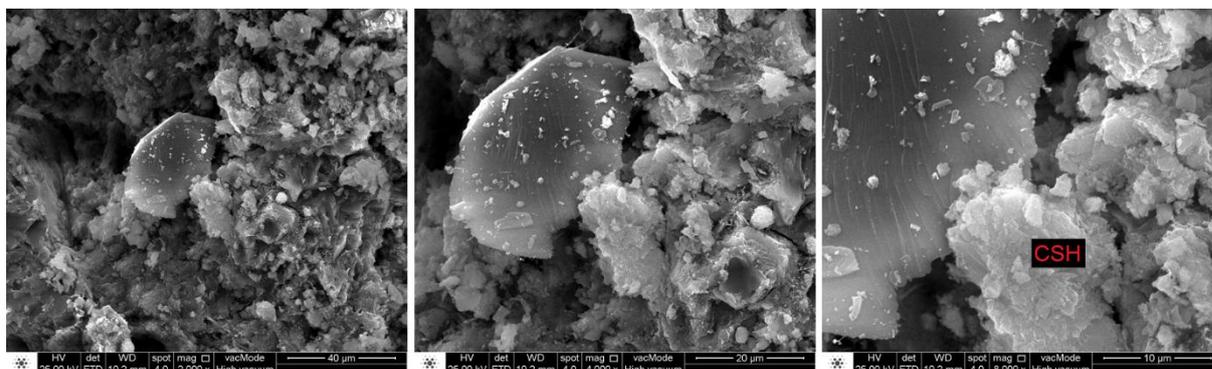
Fonte: Própria Autora (2019).

A microestrutura das argamassas foi analisada por microscopia eletrônica de varredura. O fragmento escolhido para análise foi extraído das argamassas com idade superior a 28 dias. As microanálises foram realizadas em todas as amostras. A primeira identificação com nível de magnitude de 1000x, e a segunda de 8000x a fim de aumentar a sensibilidade do aparelho.

Na Figura 62 é possível identificar as micrografias e a microanálise EDS da argamassa com e sem RCV com magnitude 1000x.

A relação Ca/Si para as amostras de referência (0% RCV), 10% RCV, 20% RCV e 30% RCV foram de 1,75; 0,36; 0,12 e 0,93, respectivamente. As microanálises com maior nível de magnitude estão apresentadas a seguir.

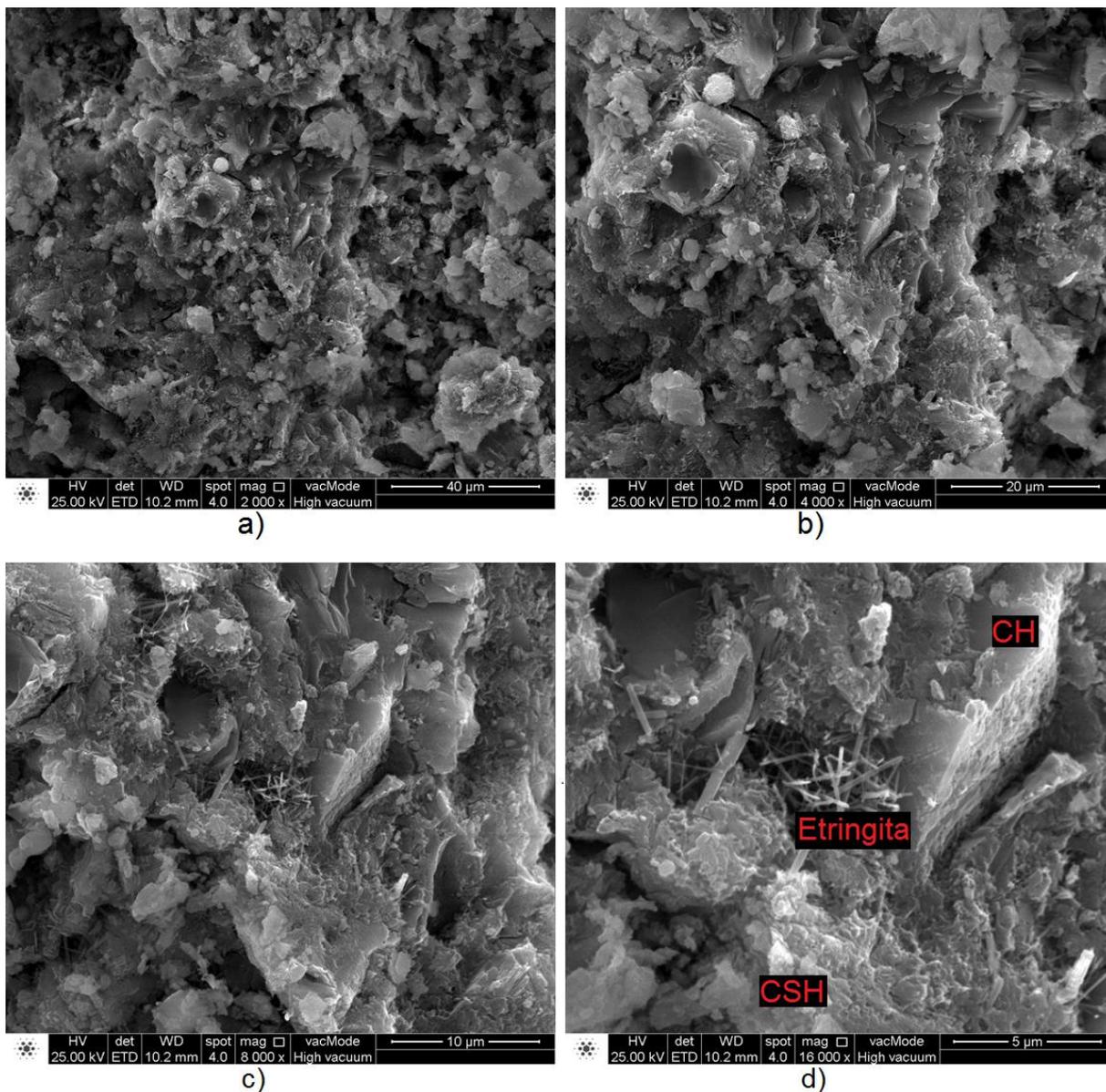
Figura 63: Micrografias da argamassa de referência: a) mag2000x; b) mag4000x e c) mag8000x.



Fonte: Própria Autora (2019).

Na Figura 64 observa-se as micrografias da amostra de argamassa referência (0% RCV) que retrata bem os produtos de hidratação dos compostos cimentícios, a formação de CSH, portlandita (CH) e a existência de bolha de ar preenchida com etringita. Observa-se também a formação de gel de CSH e o intertravamento das partículas que promovem a pega e o endurecimento da matriz cimentícia.

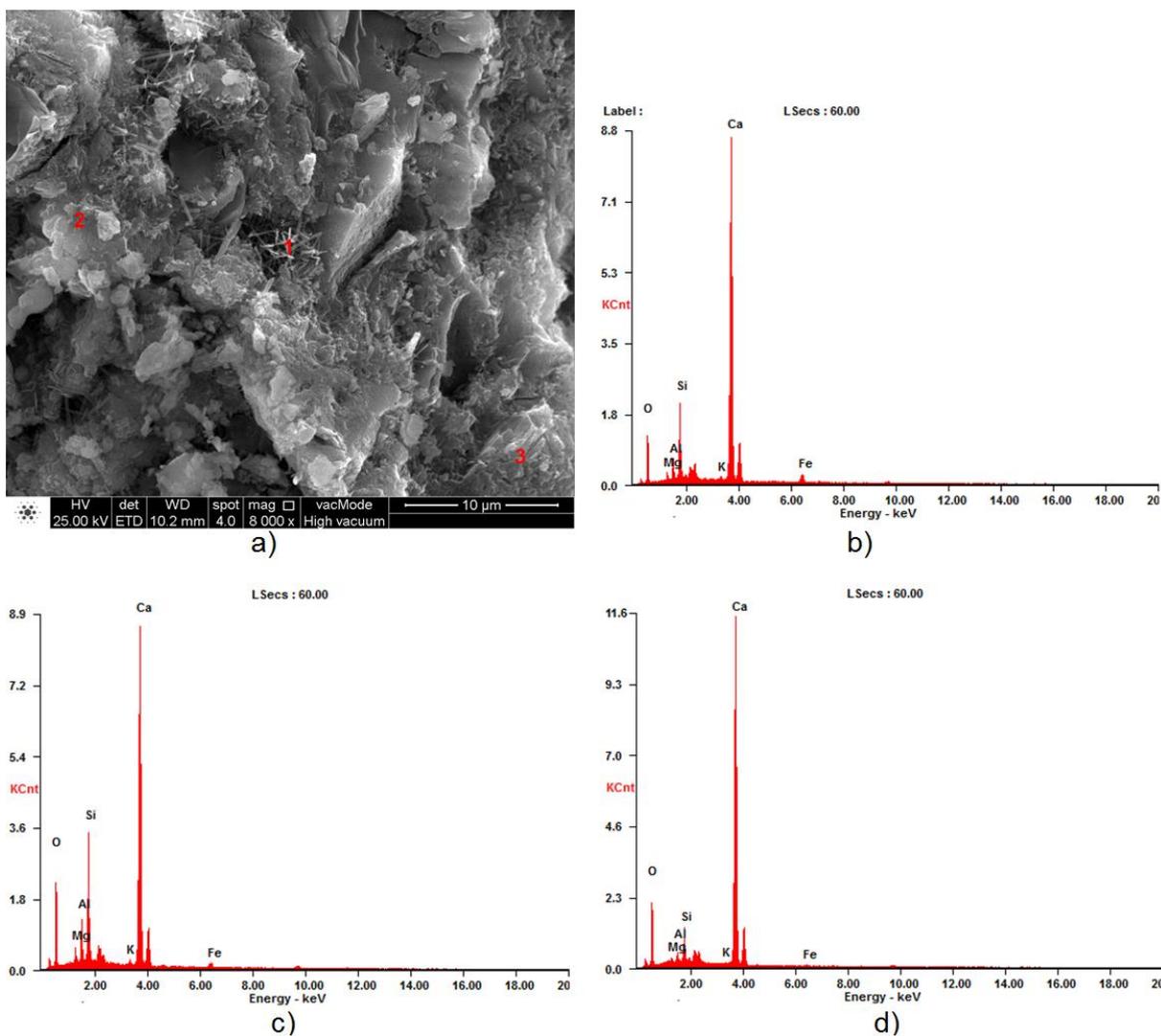
Figura 64: Micrografias da argamassa de referência (0% RCV): formação de CSH e CH, bolha de ar preenchida com etringita, pontos de microanálise EDS.



Fonte: Própria Autora (2019).

Foram realizadas microanálises (Figura 65) com a finalidade de verificar a relação Ca/Si. Para a amostra de referência as relações de Ca/Si foram de 5,37; 3,17 e 11,72 para os pontos 1, 2 e 3 respectivamente.

Figura 65: Microanálise das diferentes regiões na argamassa de 0% RCV.



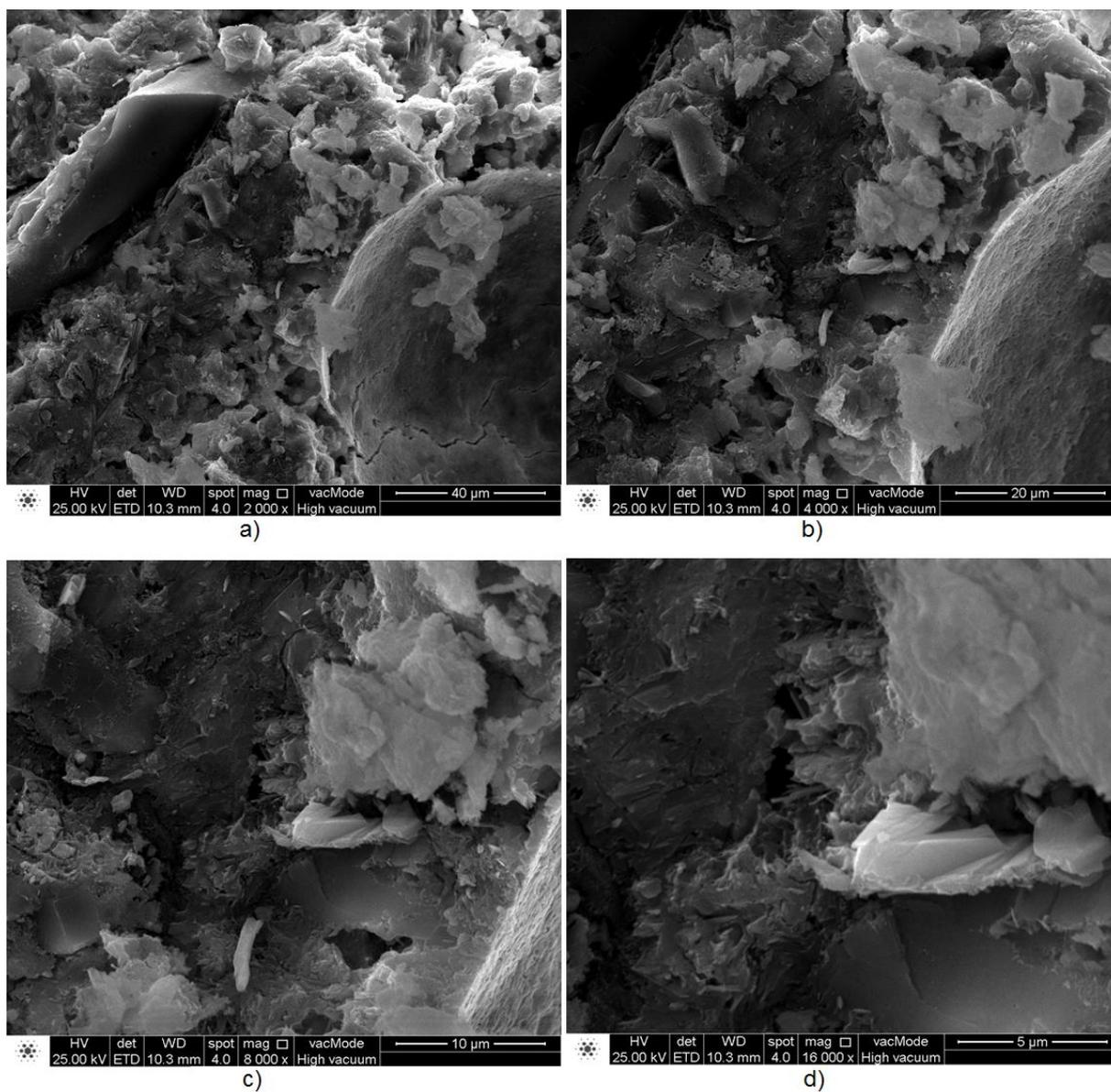
Fonte: Própria Autora (2019).

Na argamassa de 10% RCV foram identificadas partículas de etringita nas micrografias e dois tipos de fraturas, a fratura transgranular e a fratura intergranular.

A fratura transgranular ocorreu no traço de 10% RCV, observando o rompimento de agregado e a pasta. Verifica-se tal comportamento no canto inferior direito da Figura 66 - a).

As fraturas intergranulares estavam presentes nos traços com maior percentual de resíduos de carvão vegetal, ocorrendo a fratura na pasta e não no agregado.

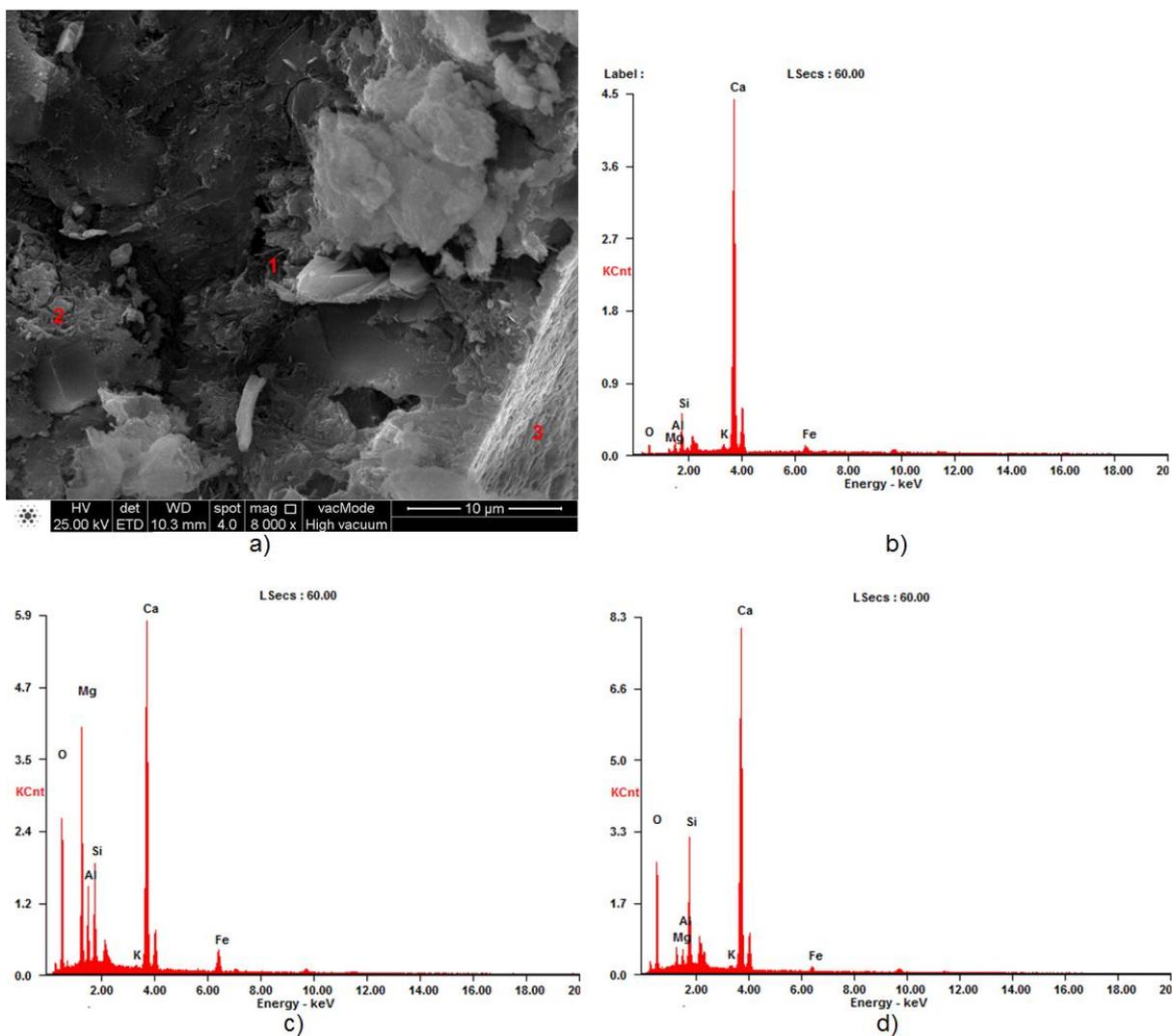
Figura 66: Micrografias da argamassa 10% RCV.



Fonte: Própria Autora (2019).

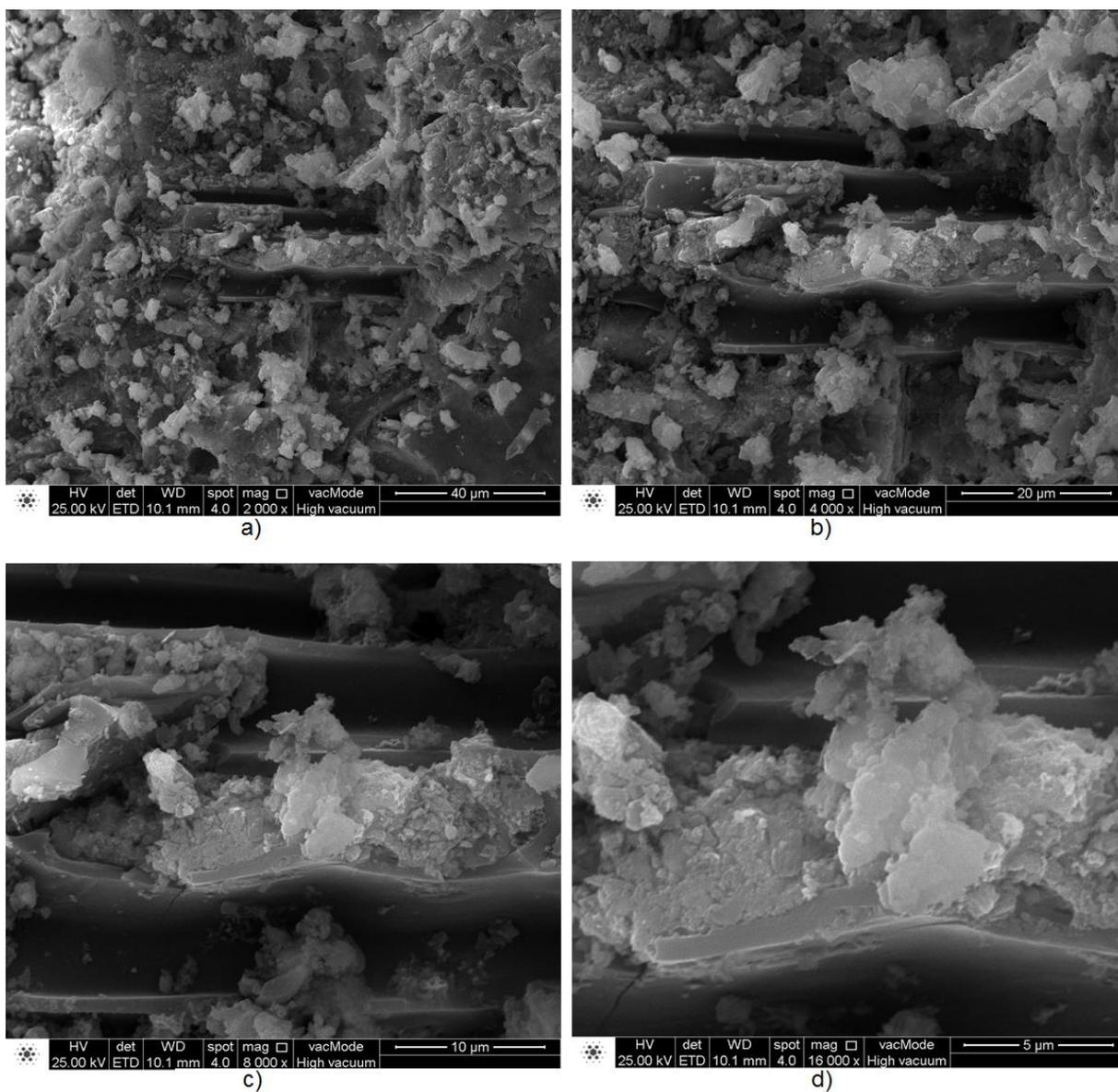
Na microanálise da amostra de argamassa com 10% RCV (Figura 67), foram identificados os seguintes elementos: cálcio, potássio, silício, ferro, magnésio e alumínio, o que corroboraram com a análise de fluorescência de raios-X e com a microanálise EDS realizadas na amostra de RCV. Na argamassa de 10% de RCV, os pontos onde foram realizadas as microanálises, apresentaram relação Ca/Si de 12,10; 3,71 e 3,14 para os pontos 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 67: Microanálise das diferentes regiões na argamassa de 10% RCV.



Fonte: Própria Autora (2019).

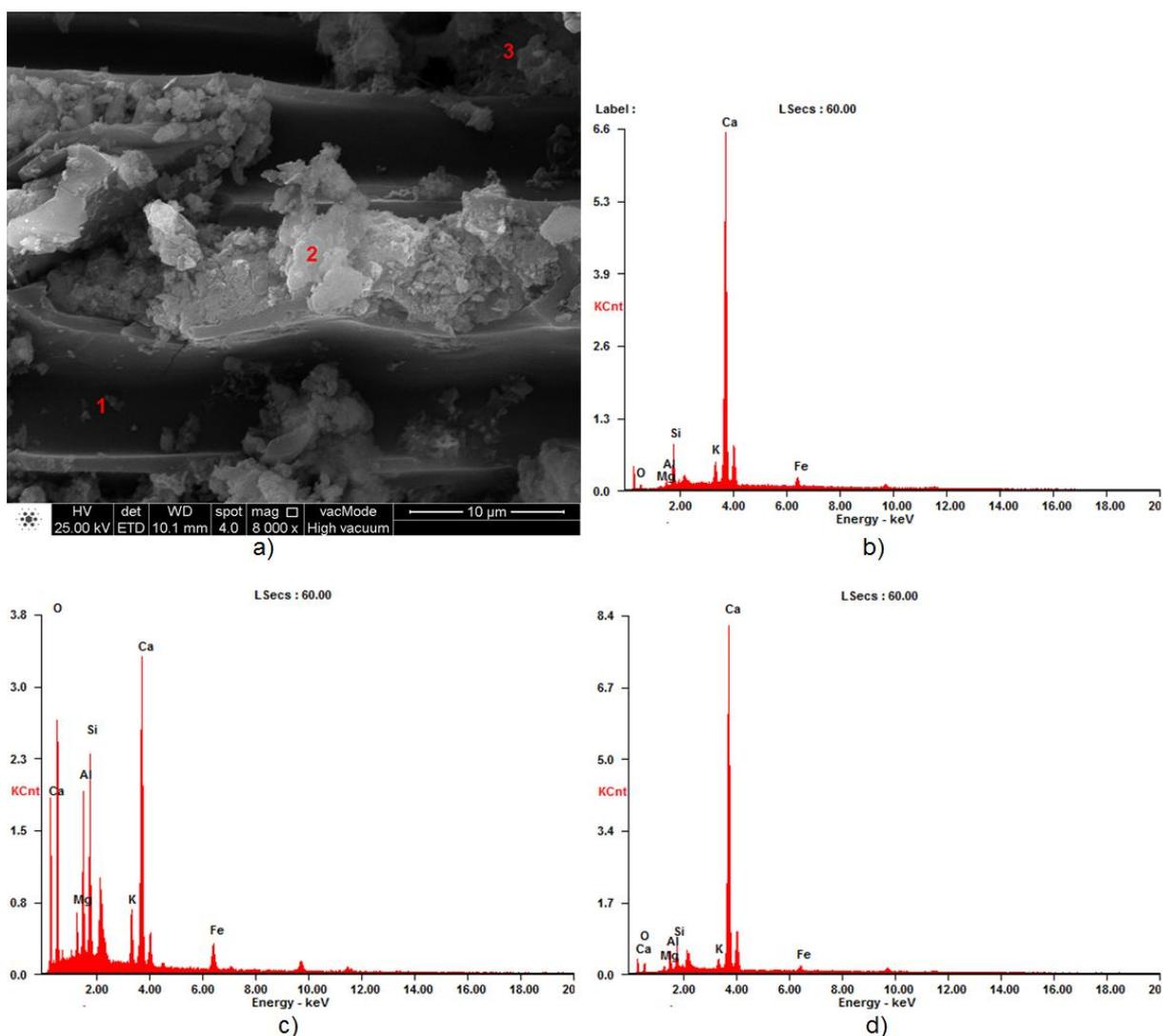
Na argamassa de 20% RCV foram identificadas placas de portlandita e a formação de CSH (Figura 68). Na microanálise realizada na amostra de 20% RCV, foram identificados os mesmos elementos da argamassa de 10% RCV, cálcio, potássio, silício, ferro, magnésio e alumínio.

Figura 68: Micrografias da argamassa 20% RCV.

Fonte: Própria Autora (2019).

Nos pontos onde foram realizadas as microanálises (Figura 69), verifica-se relação Ca/Si de 10,97; 1,75 e 14,04 para os pontos 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 69: Microanálise das diferentes regiões na argamassa de 20% RCV.



Fonte: Própria Autora (2019).

Nas argamassas produzidas com RCV foi possível identificar relação Ca/Si menor quando comparadas com a argamassa de referência para as microanálises realizadas com nível de magnitude 1000x. Para as microanálises com nível de magnitude 8000x, todas as amostras de argamassa apresentaram aumento da relação Ca/Si. A argamassa com 10% RCV apresentou menor relação Ca/Si quando comparada à argamassa de referência, já a argamassa 20% RCV apresentou maior relação Ca/Si quando comparada à argamassa de referência.

4.4 SUGESTÕES DE UTILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL

A incorporação de resíduos de carvão vegetal (RCV) demonstrou-se satisfatória nos exemplares de argamassa com teor de 20% RCV em relação ao de referência. Ponderando-se que os resultados para resistência à compressão sobressaíram a 25 MPa, pode-se citar

que são possíveis várias aplicações deste resíduo no setor da construção civil, como listado a seguir:

- Calçadas, guias, sarjetas, locais sem peso ou tração;
- Lajes de pequeno porte e estruturas onde há somente circulação de pessoas e requer pouco peso;
- Estacas hélice;
- Blocos de pavimentação intertravados;
- Blocos de vedação;
- Placas de concreto divisórias.

Ressalva-se que, todos os exemplos citados devem ser especificados, dimensionados e indicados por técnicos habilitados e engenheiros.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos no estudo experimental, pode-se concluir que os resíduos de carvão vegetal, predominantemente derivados da combustão de lenha de eucalipto, são ricos em cálcio, sendo compostos predominantemente por calcita. Considerando que as pozolanas, isoladamente, não possuem capacidade aglomerante e necessitam de uma fonte de cálcio, a incorporação desse elemento tende a propiciar tal capacidade, entretanto, não pode ser considerado um material pozolânico, uma vez que não atende aos requisitos químicos e físicos preconizados pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Em relação ao ensaio de consistência, verificou-se que conforme se aumenta o teor de RCV, há uma notória queda na fluidez e trabalhabilidade das argamassas. Para o traço com 10% RCV, obteve-se uma maior plasticidade das argamassas, em relação às demais composições que utilizaram o RCV. O traço com 20% RCV e com 30% RCV apresentaram uma queda considerável na consistência, produzindo uma argamassa menos fluida e plástica.

No ensaio de absorção de água por imersão, as argamassas com maior teor de RCV apresentaram os maiores valores. Ao analisar a absorção em função do teor de substituição de 20% RCV, notou-se que os valores de absorção foram maiores em relação à argamassa de referência, apesar deste ser mais resistente. Esse fato pode ser explicado pela microestrutura dos poros dessa argamassa. Como a porosidade total das misturas com teor de 20% RCV é maior, sugere-se, portanto, que elas possuem um maior volume de poros menores, não impactando negativamente na resistência. Já as misturas de referência (0% RCV) e de 10% RCV, possuem porosidade total menor, mas sugere-se que possuem maior volume de poros com dimensão maior, impactando a resistência.

Pode-se perceber que os corpos de prova com substituição de RCV apresentaram colorações mais escuras, proporcionais à adição de resíduos de carvão vegetal, tal fato pode ser explicado pela tonalidade escura dos mesmos.

De acordo com os ensaios realizados em laboratório, o emprego de resíduos de carvão vegetal à formulação de argamassas é tecnicamente viável como substituto à areia. A incorporação de RCV, desde que nos teores adequados, atende aos requisitos de resistência à compressão, já que as argamassas produzidas atenderam à resistência mínima de 20 MPa. Como já mencionado, não foi verificada a substituição do cimento pelo RCV nos estudos realizados.

O teor de substituição que proporcionou melhor resultado de resistência à compressão foi o de 20% RCV. A utilização do teor de 30% RCV provocou defeitos na matriz cimentícia devido aos problemas de dispersão das partículas.

Os ensaios mostraram que a produção de argamassa contendo resíduos de carvão vegetal é interessante para a indústria da construção civil, não só na parte técnica como também em aspectos econômicos e ambientais. Os RCV possuem pouco ou nenhum valor comercial e a fabricação de argamassas à base desses viabiliza a economia de consumo de materiais, além de diminuir o descarte de resíduos e minimização de passivos ambientais.

Os resultados alcançados permitem supor que novas adições do RCV podem ser estudadas com mais ênfase, não somente nas argamassas, mas em todas as matrizes cimentícias. Espera-se ter demonstrado que com relação à sistemática do reaproveitamento de resíduos, é possível utilizar parte dos resíduos da indústria carvoeira no setor da construção civil, de forma a diminuir o impacto do descarte inadequado destes no meio ambiente.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas a seguir algumas sugestões para dar continuidade ao estudo desenvolvido:

- Realizar ensaios de resistência à compressão sobre os corpos de prova com o objetivo de observar as reações secundárias que se intensificam para idades mais avançadas;
- Avaliar a suscetibilidade das argamassas produzidas ao transporte de agentes agressivos por meio de ensaio de penetrabilidade de cloretos e resistividade elétrica;
- Monitorar o desenvolvimento da hidratação das argamassas produzidas com RCV por meio do ensaio de resistividade elétrica;
- Realizar um estudo de viabilidade econômica para verificar a economicidade do uso de cinza de carvão mineral em argamassas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAL, M. J. J.; GRONLI, M. The art, Science, and Technology of Charcoal Production. Ind. Eng. Chem. Res. N. 42, p. 1619-1640, 2003.

ARCELOR MITTAL. **Finos de Carvão**. 2019. Disponível em: <<http://www.desafioarcelormittal.com.br/sobre>>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2019.

ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista árvore**, Viçosa-MG, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7 ed. São Paulo, 2002. 28 p. (BT-106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004** – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11172** – Aglomerante de origem mineral – Terminologia. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12653** – Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 6p.

_____. **NBR 16605** – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4p.

_____. **NBR 5752** – Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4p.

_____. **NBR 6118** Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

_____. **NBR 7211** – Agregados miúdos e grãos destinados a produção de concretos de cimento Portland - Especificações. Rio de Janeiro, 2009. 9p.

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

_____. **NBR 7222** – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

_____. **NBR 9776** – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

_____. **NBR 9778** – Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

_____. **NBR 9779** – Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012. 3p.

_____. **NBR NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 13p.

_____. **NBR NM 27** – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30** – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3p.

_____. **NBR NM 45** – Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

_____. **NBR NM 46** – Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. **NBR NM 52** – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

BAN, C. C.; RAMLI, M. Properties of high calcium wood ash and densified silica fume blended cement. **International Journal of Physical Sciences**. v. 6, n. 28, p. 6596-6606, 2011.

BATT, A.S.; GARG, A. Partial Replacement of Wood Ash with Ordinary Portland Cement and Foundry Sand as Fine Aggregate. **Journal of Civil & Environmental Engineering**. v. 7: 272. doi: 10.4172 / 2165-784X.1000272, 2017.

BELINE, E. L.; ANGELOTTI, A. M.; COELHO, T. M.; SANTOS, B. Substituição de agregados graúdos do concreto por materiais alternativos na fabricação de elementos não estruturais em concreto leve. In: IX ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL, Campo Mourão. **IX EEPA**, 2015.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. Difração de raios-X em cristais. Universidade Federal do Ceará, UFC. Fortaleza, CE. 2000. 19p.

BORTOLETTO, M; GUIMARÃES, P.V.C.; SILVA, R.G.; AKASAKI, J.L. Avaliação do resíduo cinza da madeira de eucalipto como substituição parcial da areia em argamassas de cimento. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 10, n. 18, p. 80-93, 2017.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeira da Amazônia, **IPEF – Série Técnica**, Piracicaba, v.2, n.5, p. 1-25, 1981.

CAMIOTO, F. C.; REBELATTO, D. A. N. Análise da contribuição ambiental por meio da alteração da matriz energética do setor brasileiro de ferro-gusa e aço. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 21, n. 4, p. 732-744, 2014.

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de Eucalyptus: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR**. 2008. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2008.

CASTRO, R. R.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R. Rentabilidade econômica e risco na produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 353-359, 2007.

CHANDRASEKHAR, S.; PRAMADA, P. N.; MAJEED, J. Effect of calcination temperature and heating rate on the optical properties and reactivity of rice husk ash. **Journal of Materials Science**, v.41, ed.23, p. 7926-7933, 2006.

CHOWDHURY, S.; MISHRA, A.; SUGANYA, O.M. Desenvolvimento de resistência em concreto com cimento de cinza de madeira e uso de modelos de computação leve para prever parâmetros de resistência. **Journal of Advanced Research**, v. 6, p. 907-913, nov. 2015.

CINCOTTO, M. A. **Disciplina PCC 5042 “Ciência dos materiais aplicada aos ligantes inorgânicos”**. São Paulo, 2014.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, 2009.

CUNHA, R. R. **Emprego do resíduo silício metálico na produção de cimento Portland Composto**. 2017. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil na Área de Materiais e Construção Civil) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2017.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v.2, p.1946, cap.8, 2011.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, p.60, ISBN: 978-85-7430-702-2. 2007.

DHENGARE, S. W.; RAUT, S. P.; BANDWAL, N. V.; KHANGAN, A. Investigation into utilization of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete. **International Journal of Emerging Engineering Research and Technology**, v.3, Issue 4, p. 109-116, 2015.

DUBOC, E.; COSTA, C. J.; VELOSO, R. F.; OLIVEIRA, L. S.; PALUDO, A. Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado. Planaltina-DF, **Embrapa Cerrados**, 37 p.37, 2007. ISSN 1517-5111

ELIAS, D. S.; SOARES, A. B.; SOUZA, H. P. Aproveitamento de resíduos sólidos – Estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, **V CBCM**. Criciúma-SC, 2017.

FERREIRA, E. A.; MANUEL, R. O.; BELINI, C. M. B. **Melhoramento florestal e biotecnologia**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017, 184p. ISBN 978-85-8482-854-8

FERREIRA, G. C.; DAITX, E. C. Mercado produtor de areia industrial no estado de São Paulo, Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v.22, N. Especial, p.41-47, 2003.

FLATO, U. A. P.; BUHATEM, T.; MERLUZZI, T.; BIANCO, A. C. M. Novos anticoagulantes em cuidados intensivos, **Revista Brasileira de Terapia Intensiva**, 23(1), p. 68-77, 2011.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologia e Tendências**, v.9, nº 1, p. 1-19, 2014.

GOMES, P. B. **Caracterização de materiais: uma abordagem das possibilidades de algumas técnicas instrumentais**. Monografia Curso de Química. Universidade Federal de São João del-Rei, 30f. 2015

GONÇALVES, F. G.; SILVA, A. G.; FERRARO, A. C.; COSTA, N. N. M.; SOUZA, R. A. B.; TOSATO, A. F. Captação de líquido pirolenhoso da carbonização da madeira de Eucalyptus cloeziana em forno rabo quente. **Revista Brasileira de Ciência Agrária**. Recife, v.5, n.2, p.232-237, 2010.

GREEN DOMUS. A construção civil e seu impacto no meio ambiente. 2017. Disponível em: <<http://greendomus.com.br/a-construcao-civil-e-seu-impacto-no-meio-ambiente/>>, Acesso em: 19 de Março de 2018.

GRESSLER, L. A. **Introdução à pesquisa: projetos e relatórios**. 2 ed. São Paulo: Loyola, 2004, 295p.

GRUPO TCHÊ QUÍMICA. **Carvão**. Disponível em: <<http://www.deboni.he.com.br/carvao.pdf>> . Acesso em: 13 de agosto de 2018.

HELENE, P; ISAIA, G.C; TUTIKIAN, B.F. Concreto de Alto e Ultra Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, Cap 36, 2011.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório IBÁ – 2017**. Indicadores de desempenho do setor nacional de árvores plantadas referentes ao ano de 2017. Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em 18 de fevereiro de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo demográfico, 2017*. Disponível em: www.ibge.gov.br/. Acesso em: 19 Fev. 2018.

_____. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), Rio de Janeiro, v.32, p. 1-8, 2017.

LAIRD, D. A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestration carbono, while improving soil and water quality. **Agronomy Journal**, v. 100, n, 1, p. 178-181, 2008.

LAIRD, D. A. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestration carbono, while improving soil and water quality. **Agronomy Journal**, v. 100, n 1, p. 178-181, 2008.

LEITE, A. L. C. B. **Carvão vegetal: desenvolvimento de indicadores tecnológicos a partir da análise de documentos de patentes**. 2013, 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos, 2013.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de madeira de Pinus spp. Cinza volante e escória de alto forno em compósito cimento-madeira. **Floresta**, Curitiba, PR, v.42, n.3, p.639-650, 2012.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos do desdobro de toras de Pinus spp, sílica ativa e cinza de casca de arroz em compósito cimento-madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.38, n.87, p.459-469, 2010.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v.32, n.4, p. 383-389, 2010.

LIMA, S.A.; ROSSIGNOLO, J.A. Análise da pozolanicidade da cinza da casca da castanha do caju pelo método de difratometria de raios X. **Revista Matéria**, v. 14, n. 1, pp. 680-688, 2009.

LIMA, S.A.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; MORETTI, J. P.; PORTELLA, K. F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído (Online)**, v. 11, p. 201-212, 2011.

LOPES, J.; MATHEUS, M. E. Risco de hepatotoxicidade do Paracetamol (Acetaminofem), **Revista Brasileira de Farmácia**, p. 411-414, 2012.

LOTURCO, R. Apagão Florestal. **Revista Crescer**. Disponível em: <<http://revistacrescer.globo.com/Revista/Crescer/0,,ERT5907-15565,00.html>>. Acesso em 27 de março de 2018.

MALTA, J. O.; SILVA, V. S.; GONÇALVES, J. P. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v.1, n.2, p. 176-188, 2013.

MARTINS, A. F.; DINIZ, J.; STAHL, J. A.; CARDOSO, A. L. Caracterização dos produtos líquidos e do carvão da pirólise de serragem de eucalipto. **Química Nova**, vol. 30, nº 4, p. 873-878, 2007.

MATOS, S. R. C.; GUIMARÃES, C. C. Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v.13, n. 1, 2017.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Florianópolis: IBRACON, 2011. V. 2, cap. 22, p. 1327-1365.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3ª. Ed. New Yoork: McGraw-Hill Professional, 2006.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994, 577P. isbn 85-7266-040-2.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Energético Nacional 2017: Ano base 2016**, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Rio de Janeiro: EPE, 2017.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduos agroindustriais em matrizes cimentícias**. 2018. 180f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

MOTA, L. C. S.; FERREIRA, R. H. C.; FIGUEIRA, S. L.; MONTEL, A. L. B.; D'OLIVEIRA, M. C. P. E. Avaliação dos efeitos da adição de carvão ativado residual ao concreto. In.: X CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO – SBSP2014, **Anais 59º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2017**, Bento Gonçalves-RS, 2017.

MOURA, G. A., **Grupo Plantar – 40 Anos no Caminho da Sustentabilidade**. In: 6ª Conferência Latino-Americana sobre Meio Ambiente e Responsabilidade Social. Belo Horizonte. Setembro, 2006.

NASCIMENTO, J. E. M. F.; SANTOS, H. M. M.; NETO, M. F. S.; JÚNIOR, J. C. C. S. Avaliação das propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido após a adição de cinza de madeira. **Cientefico**. v.16, n.34, p129-150, Fortaleza, 2016.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto / Tradução Salvador E. Giammusso* – São Paulo, PINI, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto / Tradução Ruy Alberto Cremonini, 2^oed., bookman, 2013.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**, Curitiba, PR, v.45, n.1, p.57-64, 2015.

NORGATE, T. E.; LANGBERG, D. E. Aspectos ambientais e econômicos do uso do carvão vegetal na siderurgia. **ISIJ International**, v. 49, p. 587-595, 2009.

OLIVEIRA, A. C.; SALLES, T. T.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BRAGA, C. S.; SANTOS, R. C. Viabilidade econômica da produção de carvão vegetal em dois sistemas produtivos. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 44, n. 1, p. 143-152, 2014.

OLIVEIRA, C.A. S.; GOUVEIA, L. L. A.; TEIXEIRA, R. L. P. Concreto estrutural com adição de fibras vegetais. **Construindo**, Belo Horizonte, v.6, n.2, p.14-19, 2014.

OTTOSEN, L. M.; HANSEN, E.Ø; JENSEN, P. E.; KIRKELUND, G. M.; GOLTERMANN, P. Wood ash used as partly sand and/or cement replacent in mortar. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v.11, n.5, p.781-791, 2016.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: a review. **Construction and Building Materials**, v. 25 (2), p. 575-581, 2010.

PATERNIANI, J. E. S.; DA SILVA, M. J. M.; RIBEIRO, T. A. P.; BARBOSA, M. Pré-filtração em pedregulho e filtração lenta com areia, manta não tecida e carvão ativado para polimento de efluentes domésticos tratados em leitos cultivados, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 803-812, 2011.

PAULA, L. G.; SILVA, R. J.; BERNARDO, A. C. S. M. Análise termoeconômica do processo de produção de cimento Portland utilizando uma mistura de combustíveis e o coprocessamento de pneus usados, In: IV CONGRESSO NACIONAL D ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, **Anais do CONEM** Campina Grande - Paraíba, 2010.

PINHEIRO, P. C. C.; SAMPAIO, R. S.; BASTOS FILHO, J. G. Organização da produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 3, p. 253-258, 2005.

PIRES, D. R. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial de cimento Portland por cinzas de algaroba geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de confecções pernambucano**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2016.

RAMOS, F. V. **Argamassas utilizando agregado leve à base de resíduo de carvão vegetal (RCV)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais) – Universidade Freevale, FREEVALE, Brasil, 2015.

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Strength and durability of Mortar using cork waste ash as cement replacement. **Materials Research**, v. 17, n. 4, p. 893-907, 2014. ISSN 1516-1439.

RAMPAZZO, L. **Metodologia Científica: para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação**. 3^a edição. São Paulo: Edições Loyola, 141 p., 2005.

REDDY, M. V. S.; ASHALATHA, K.; MADHURI, M., SUMALATHA, P. Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in concrete by partial replacement of cement. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, v.12, Issue 6 Ver. VI, p. 12-16, 2015.

REPETTE, W. L.; SIQUEIRA, L. V. M.; ONGUERO, L.; CRUZ, A. G. F.; DALMORO, A. J.; PALOMBO, M. G. Uso de cinza pesada na produção de concreto autoadensável. In: VI CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, **Anais do VI CITENEL** Fortaleza/CE, 2011.

REZENDE, J. L. P.; PADUA, C. T. J.; OLIVEIRA, A. D.; SCOLFORO, J. R. S. Análise econômica de foment florestal com eucalipto no estado de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 13, p. 221-231, 2006.

RITTL, C. **Emissões de GEE no Brasil (1970-2016) e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o acordo de Paris**. 2018. Disponível em <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/08/Relatorios-SEEG-2018-Sintese-FINAL-v1.pdf>>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2019.

RODRIGUES, M. S.; BERALDO, A. L. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.2, p. 193-204, 2010.

SAMPAIO, Z. L. M. **Analysis of the Mechanical Behavior of Concretes Made by Combining ASH of the Bagasse of the Sugar-Cane of Varieties SP911049, RB92579 AND SP816949**. 2013. 150f. Dissertação (Mestrado em Mecânica das Estruturas, Estruturas de Concreto e Alvenaria e Materiais e Processos Construtivos) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2013.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Analysis of the influence of the sugar cane bagasse ashes on mechanical behavior of concrete. **IBRACON Structures and Materials Journal**, 2014, vol. 7, nº4, p. 626-647, 2014.

SANTOS, C. R.; TUBINO, R. M. C.; SCHNEIDER, I. A. H. Mineral processing and characterization of coal waste to be used as fine aggregates for concrete paving blocks. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 8, nº. 1; p. 15-24, 2015, ISSN 1983-4195.

SANTOS, S. F. O.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, v.22, n.2, p. 309-321, 2012.

SASAKI, A. C.; LIMA, L. S.; QUINÁIA, S. P. Reaproveitamento de resíduo de moinha de carvão vegetal para adsorção de íons metálicos em meio aquoso, **Revista Virtual Química**, v. 6, nº 6, 2014.

SCHVARTSMAN, C.; SCHVARTSMAN, S. Intoxicações exógenas agudas, **Jornal de Pediatria**, v. 75, supl.2, Rio de Janeiro, 1999.

SELLAMI, A.; MERZOUD, M.; AMZIANE, S. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. **Construction and Building Materials**, v.47, p.1117-1124, 2013.

SILVA, D. A. L.; CARDOSO, E. A. C.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; MALINOVSKI, R. A. Análise de viabilidade econômica de três sistemas produtivos de carvão vegetal por diferentes métodos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 1, p. 185-193, 2014.

SILVA, G. L. R.; BRAGA, E. M. H.; ASSIS, P. S.; QUINTAS, A. C. B.; DORNELAS, P. H. G.; MOURA, L. C. A.; SOUZA, R. D. S. Utilização de finos de carvão vegetal para produção de bio coque metalúrgico. In: 46º Seminário de Redução / 17º Simpósio Brasileiro / 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração, 2017, Rio de Janeiro. **Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração**, 2016. p. 127.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2013**. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2018.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas. **Cerâmica**. v. 58, n. 346, p. 275-279, 2012.

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA (SIDRA). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS)**. 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/tabelas/brasil/2017>>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2019.

SKRIPKIŪNAS, G.; MACIJAUSKAS, M.; NAGROCKIENE, D.; GAUGELA, A. The influence of biomass fly ash on the plasticizing effects in cement pastes. **Procedia Engineering**, v.172, p. 1015-1022, 2017.

SOUZA, M. C.; GÓMEZ, C. U.; DOROW, R.; A. C.; BAUER, E. A comercialização de carvão vegetal em Biguaçu, SC, no âmbito da cadeia curta espacialmente estendida. In.: X Congresso da Sociedade Brasileira de Sistemas de Produção – SBSP2014, **Anais ...**, Foz do Iguaçu, 2014.

STABH. **Carvão Vegetal**. 2018. Disponível em: <<http://www.stabh.com/carvao-vegetal/>>. Acesso em 17 de fevereiro de 2019.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of unprocessed rice husk ash and pulverized fuel ash in the production of self-compacting concrete. **IERI Procedia**, v.5, p.298-303, 2013.

SUBRAMANIAM, P.; SUBASINGHE, K.; FONSEKA, W. R. K. Wood ash as an effective raw material for concrete blocks. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 04, Issue: Fev 2015. eISSN: 2319-1163, pISSN: 2321-7308.

TANCREDI, G. A. H. **Estudo das propriedades do concreto com adição de cinza de carvão mineral de caldeiras de leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Belém, 2010.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland**. 2006. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2006.

TEIXEIRA, C. M.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; CHRISOSTOMO, W; YAMAJI, F. M. Caracterização Química de Resíduos de Eucalyptus sp. De Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia. **Revista Virtual Química**, vol. 8. nº 5, p. 1693-1701, 2016.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 67-85, 2008.

UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. A. B.; STIRMER, N. Transformation of wood ash waste into construction materials. PROCEEDINGS OF THE 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS FOR SUSTAINABLE FUTURE, p.101-108, 2017.

VELHO, E. S. **Desenvolvimento de combustível alternativo a partir dos rejeitos ultrafinos de carvão mineral e rejeitos industriais**. Relatório Técnico/Científico, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

VENKATANARAYANAN, H. K.; RANGARAJU, P. R. Evaluation of sulfate resistance of Portland cement mortars containing low-carbon rice husk ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.26, p. 582-592, 2014.

WATTS, R.; PORTER, A. L. Innovation Forecasting. **Technological Forecasting and Social Change**. N.56, p. 25-47, 1997.

YANG, Z.; HUDDLESTON, J.; BROWN, H. Effects of wood ash on properties of concrete and flowable fill. **Journal of Materials Science and Chemical Engineering**, v.4, p. 101-114, 2016.

ZONA DE RISCO. **Riscos na produção de carvão vegetal**. Disponível em: <<https://zonaderisco.blogspot.com.br/2012/07/riscos-na-producao-de-carvao-vegetal.html>>. Acesso em 27 de março de 2018.

APÊNDICE A – Dados de entrada dos corpos de prova para determinação IAP

Os dados utilizados para calcular o índice de atividade pozolânica dos resíduos de carvão vegetal (RCV) estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Resultado obtidos no ensaio de resistência à compressão para determinação IAP.

| Amostra / Traços | Resistência à Compressão (MPa) | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| | REF. | RCV |
| CP 1 | 21,65 | 11,46 |
| CP 2 | 20,38 | 11,72 |
| CP 3 | 21,65 | 11,46 |
| CP 4 | 19,10 | 10,19 |
| CP 5 | 18,34 | 10,19 |
| CP 6 | 19,10 | 10,70 |
| Média (MPa) | 20,037 | 10,953 |
| Desvio Padrão (MPa) | 1,410 | 0,68 |
| Coefficiente de Variação (%) | 7,04 | 6,23 |

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos cilíndricos aos 7, 28 e 60 dias de cada amostra estão apresentados nas Tabela 25, 26 e 27.

Tabela 25: Resultados obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 7 dias.

| Resistência à Compressão aos 7 dias | | | | |
|--|------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 25,477 | 17,834 | 26,752 | 26,752 |
| CP 2 | 21,656 | 21,656 | 28,025 | 21,656 |
| CP 3 | 29,299 | 20,382 | 26,752 | 22,929 |
| CP 4 | 24,204 | 16,560 | 28,025 | 24,204 |
| CP 5 | 28,025 | 26,752 | 29,299 | 25,477 |
| Média (MPa) | 25,732 | 20,637 | 27,771 | 24,204 |
| Desvio Padrão (MPa) | 3,041 | 3,968 | 1,065 | 2,014 |
| Coefficiente de Variação (%) | 11,819 | 19,227 | 3,836 | 8,322 |

Tabela 26: Resultado obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 28 dias.

| Resistência à Compressão aos 28 dias | | | | |
|---|------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 26,752 | 25,478 | 28,025 | 28,025 |
| CP 2 | 28,025 | 28,025 | 29,300 | 26,752 |
| CP 3 | 25,498 | 26,752 | 28,535 | 25,478 |
| CP 4 | 28,025 | 25,478 | 28,025 | 25,478 |
| CP 5 | 29,300 | 29,300 | 26,752 | 29,300 |
| Média (MPa) | 27,520 | 27,007 | 28,127 | 27,007 |
| Desvio Padrão (MPa) | 1,452 | 1,661 | 0,929 | 1,661 |
| Coefficiente de Variação (%) | 5,276 | 6,150 | 3,303 | 6,150 |

Tabela 27: Resultado obtidos no ensaio de Resistência à Compressão aos 60 dias.

| Resistência à Compressão aos 60 dias | | | | |
|---|------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 26,75 | 26,75 | 34,39 | 25,48 |
| CP 2 | 29,30 | 28,53 | 29,30 | 26,75 |
| CP 3 | 27,52 | 25,48 | 29,55 | 24,45 |
| CP 4 | 29,30 | 31,85 | 26,75 | 29,30 |
| CP 5 | 28,03 | 22,93 | 33,12 | 26,75 |
| Média (MPa) | 28,180 | 27,108 | 30,622 | 26,546 |
| Desvio Padrão (MPa) | 1,12 | 3,34 | 3,09 | 1,82 |
| Coefficiente de Variação (%) | 3,97 | 12,33 | 10,11 | 6,84 |

APÊNDICE C – Resultados dos ensaios de resistência à tração

Os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos corpos cilíndricos aos 28 dias de cada amostra estão apresentados nas Tabela 28.

Tabela 28: Resultado obtidos no ensaio de Resistência à Tração aos 28 dias.

| Resistência à Tração por compressão diametral aos 28 dias | | | | |
|--|------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 4,456 | 4,456 | 3,183 | 2,228 |
| CP 2 | 4,456 | 3,183 | 3,183 | 2,546 |
| CP 3 | 4,775 | 2,228 | 2,228 | 4,138 |
| CP 4 | 3,820 | 3,501 | 3,501 | 3,183 |
| CP 5 | 2,865 | 2,546 | 2,546 | 3,82 |
| Média (MPa) | 4,074 | 3,183 | 2,928 | 3,183 |
| Desvio Padrão (MPa) | 0,760 | 0,872 | 0,523 | 0,872 |
| Coeficiente de Variação (%) | 18,65 | 27,39 | 17,86 | 25,5 |

APÊNDICE D – Dados dos ensaios de absorção de água por imersão

Os dados utilizados para calcular a absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica para as argamassas na idade de 28 dias estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29: Dados dos ensaios de absorção de água aos 28 dias.

| Absorção de água / Índice de vazios / Massa Específica (28 dias) | | | | |
|---|------------|----------------|----------------|----------------|
| Massa seca em estufa - Ms (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 373,60 | 369,12 | 361,45 | 351,24 |
| CP 2 | 378,46 | 366,42 | 359,25 | 347,79 |
| CP 3 | 370,30 | 370,80 | 353,72 | 348,78 |
| CP 4 | 376,78 | 373,13 | 359,30 | 349,14 |
| CP 5 | 373,45 | 369,14 | 356,99 | 354,60 |
| Massa saturada após 72 horas de imersão - Msat (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 420,77 | 418,00 | 412,29 | 408,09 |
| CP 2 | 425,65 | 415,35 | 411,97 | 405,33 |
| CP 3 | 418,73 | 422,15 | 407,42 | 405,27 |
| CP 4 | 425,62 | 423,18 | 412,13 | 405,50 |
| CP 5 | 422,15 | 420,86 | 411,10 | 409,72 |
| Massa imersa após 72 horas de imersão - Mi (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 220,71 | 219,88 | 214,29 | 207,36 |
| CP 2 | 224,82 | 218,73 | 213,42 | 205,00 |
| CP 3 | 217,33 | 221,77 | 210,30 | 205,62 |
| CP 4 | 224,37 | 222,80 | 214,35 | 206,09 |
| CP 5 | 221,00 | 220,19 | 213,28 | 209,03 |

APÊNDICE E – Dados dos ensaios da absorção de água por capilaridade

Os dados utilizados para calcular a absorção de água por capilaridade e coeficiente de sortividade das argamassas aos 28 dias estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

| Massa seca em estufa e impermeabilizada com silicone (gramas) | | | | |
|--|------------|----------------|----------------|----------------|
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 380,26 | 368,20 | 375,08 | 366,16 |
| CP 2 | 378,53 | 373,15 | 362,18 | 368,08 |
| CP 3 | 375,85 | 368,36 | 364,72 | 363,21 |
| CP 4 | 377,23 | 371,02 | 365,55 | 365,21 |
| CP 5 | 378,91 | 365,90 | 369,51 | 368,90 |
| Massa após 3 horas (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 385,99 | 373,57 | 376,59 | 367,08 |
| CP 2 | 384,12 | 373,94 | 362,90 | 369,15 |
| CP 3 | 380,59 | 369,36 | 365,53 | 364,10 |
| CP 4 | 378,69 | 376,75 | 366,50 | 365,96 |
| CP 5 | 389,04 | 366,58 | 376,52 | 369,63 |
| Massa após 6 horas (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 388,38 | 375,86 | 377,33 | 367,53 |
| CP 2 | 386,19 | 374,28 | 363,24 | 369,71 |
| CP 3 | 382,63 | 369,86 | 365,87 | 364,52 |
| CP 4 | 379,42 | 378,81 | 366,95 | 366,26 |
| CP 5 | 392,86 | 366,88 | 379,10 | 369,92 |
| Massa após 9 horas (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 390,41 | 377,84 | 378,08 | 367,90 |
| CP 2 | 387,97 | 374,52 | 363,49 | 370,19 |
| CP 3 | 384,44 | 370,29 | 366,20 | 364,93 |
| CP 4 | 380,13 | 380,53 | 367,39 | 366,57 |
| CP 5 | 396,16 | 367,03 | 381,36 | 370,18 |
| Massa após 24 horas (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 396,60 | 383,77 | 381,50 | 370,01 |
| CP 2 | 393,25 | 376,06 | 365,08 | 372,61 |
| CP 3 | 390,09 | 372,79 | 367,82 | 366,83 |
| CP 4 | 383,71 | 385,68 | 369,64 | 368,04 |
| CP 5 | 406,09 | 368,49 | 388,55 | 371,65 |
| Massa após 48 horas (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 401,78 | 388,75 | 385,29 | 372,74 |
| CP 2 | 397,74 | 377,85 | 366,98 | 375,54 |
| CP 3 | 394,99 | 375,79 | 369,89 | 369,09 |
| CP 4 | 388,11 | 390,00 | 372,4 | 369,82 |
| CP 5 | 413,84 | 370,10 | 395,28 | 373,38 |
| Massa após 72 horas (gramas) | | | | |
| Amostra / Traços | REF | 10% RCV | 20% RCV | 30% RCV |
| CP 1 | 404,73 | 391,75 | 387,77 | 374,91 |
| CP 2 | 400,49 | 379,18 | 368,45 | 377,69 |
| CP 3 | 397,90 | 377,82 | 371,34 | 370,64 |
| CP 4 | 391,41 | 392,86 | 374,35 | 371,10 |
| CP 5 | 417,69 | 371,40 | 399,54 | 374,71 |