



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS
NATURAIS DA AMAZÔNIA - PRODERNA**

DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO

**INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE ARGAMASSAS UTILIZADAS NA
INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

BELÉM - PA

2019



**INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE ARGAMASSAS UTILIZADAS NA
INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO

Defesa de tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza

Belém - PA

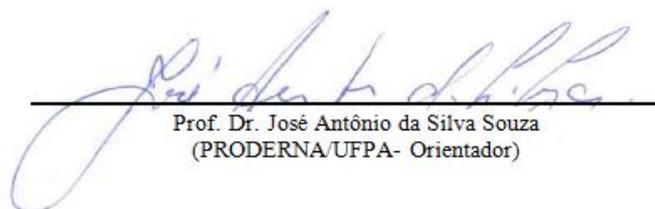
2019

**INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE ARGAMASSAS UTILIZADAS NA
INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

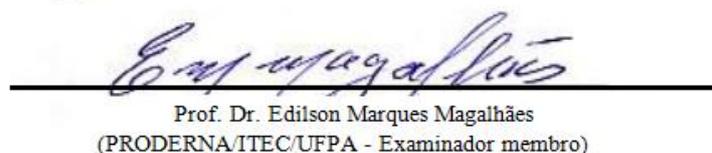
DILSON NAZARENO PEREIRA CARDOSO

DEFESA DE TESE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA, PRODERNA/ITEC, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA.

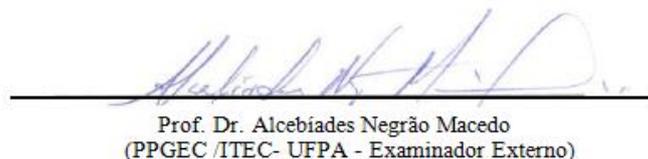
Aprovada por:



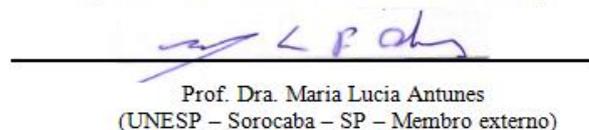
Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza
(PRODERNA/UFPA- Orientador)



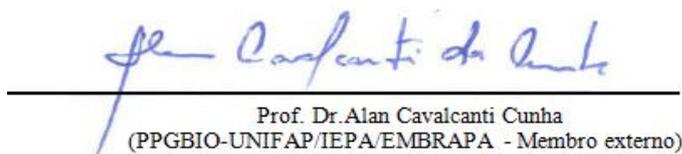
Prof. Dr. Edilson Marques Magalhães
(PRODERNA/ITEC/UFPA - Examinador membro)



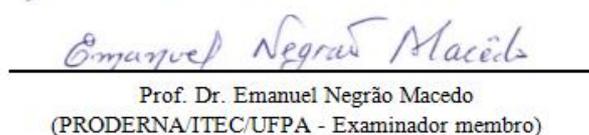
Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macedo
(PPGEC /ITEC- UFPA - Examinador Externo)



Prof. Dra. Maria Lucia Antunes
(UNESP – Sorocaba – SP – Membro externo)



Prof. Dr. Alan Cavalcanti Cunha
(PPGBIO-UNIFAP/IEPA/EMBRAPA - Membro externo)



Prof. Dr. Emanuel Negrão Macedo
(PRODERNA/ITEC/UFPA - Examinador membro)

BELÉM – PA

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) Sistemas de
Biblioteca da UFPA**

Cardoso, Dilson Nazareno Pereira, 1978-
Influência do uso de Resíduos Industriais nas
Propriedades Mecânicas e Reológicas de Argamassas
Utilizadas na Indústria da Construção Civil / Dilson
Nazareno Pereira Cardoso.- 2019.

Orientador: José Antônio da Silva Souza.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Recursos Naturais na Amazônia, Instituto
de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019

1. Reaproveitamento 2. Resíduos Industriais 3.
Argamassas 4. Compósitos Cimentícios I. Título

CDD 621.042

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Dilson Ferreira Cardoso e Naylza Pereira Cardoso. As minhas queridas e amadas irmãs Lilian Renee e Lilian Jessica, a minha esposa Isabela Cardoso e a meus queridos amados avós *in memoriam* (Raimundo Siqueira e Luciola Pereira sempre presentes em nossos pensamentos).

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao **ALTÍSSIMO SENHOR JESUS CRISTO**, criador dos céus e da terra por me dar forças para lutar e nunca desistir dos meus propósitos e objetivos, e por ter me dado a alegria de viver e a felicidade de aprender.

Ao meu Orientador Prof^o. Dr. **José Antônio** pelos incentivos, paciência, dedicação, confiança, colaboração e amizade que foram fundamentais à realização deste trabalho. A prof^a **Augusta Maria**, pelos conselhos profissionais, incentivo e apoio nas horas difíceis desse trabalho, a Prof^a **Raimunda Maia**, pela dedicação, carinho e paciência em transmitir seu conhecimento nas análises de microscopia além de seu profundo apoio e incentivo.

A minha querida esposa **Isabela Cardoso**, que muito me incentivou, a realização e a conclusão desse trabalho.

Aos meus amigos e companheiros da UFPA, dentre os quais destaco **Hellen Carvalho, Cleisianu Lima, Jefferson Barral, Leda Racanelli, Claudia Anjos, Isabela Cristina, Keylla Castro, Silvane Gonçalves, Daniele Quaresma, Diego Hidelbrando, Luis Felipe Pereira, Alacides Neves, André Wilson, André Mileo, Ronaldo Marques e Elza Brandão**.

Aos meus queridos e amados amigos de turma da Engenharia Química **Wenderson Gomes, Romero Moreira e Emerson Cardoso**, em todos esses anos desde a graduação, passando pela Pós-graduação até o presente momento nas lutas diárias na busca pela qualificação profissional.

Aos meus amigos de trabalho **Augusto Fernando (Guto), Aluizio Lins, Matheus Braga, Wilson de Nazaré, Mario Barreto, Lianne Dias, Vitoria Roma, Rafaela Pinheiro e Samara Menezes** que, além dos seus incentivos, transformaram meu ambiente de trabalho em um local agradabilíssimo e iluminado.

Ao meu amigo e técnico do Laboratório de engenharia civil, "**Joel Silva Martins**", pela gentileza, apoio, e presteza na fase de realização de ensaios laboratoriais, ao meu amigo e companheiro de treino **Carlos Gouveia** (Betão), In memoriam, que em vida sempre me incentivou a não desistir desse sonho.

Ao **Jiu-Jitsu brasileiro**, arte marcial em que sempre me dediquei pois na prática me ajudou-me muito a manter o foco em meus objetivos dando-me calma e paciência em momentos difíceis.

E a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho...

“Embora muito se perca, muito permanece; e embora não sejamos mais fortes como em tempos passados movendo céus e terras; o que somos, somos, uma só têmpera de corações heróicos, debilitados pelo tempo e o destino, mas fortes em ímpeto para lutar, buscar, encontrar, e não hesitar. Pois a nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda.”.

Alfred Lord Tennyson - adaptado de Ulisses e Confúcio

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.)

INFLUÊNCIA DO USO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DE ARGAMASSAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dilson Nazareno Pereira Cardoso

Orientadores: José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver materiais alternativos e aproveitáveis dentro da indústria da construção civil, abordando uma lógica de valorização e reaproveitamento de resíduos sólidos, gerados a partir de canteiros de obras de construção e demolição, bem como, o reaproveitamento de resíduos gerados da indústria minero metalúrgica e de beneficiamento mineral. Foram utilizados no trabalho os resíduos da construção civil (RCC), resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS) e o resíduo de caldeiras de leito fluidizado circulante a partir da combustão do carvão mineral a cinza volante (CV). As amostras desses materiais apresentaram características apropriadas, como agregado miúdo reciclado dentro da norma NBR 7211. Os materiais foram submetidos à caracterização física e química através de análise granulométrica a laser, fluorescência de raio X (FRX), Difração e raio X (DRX). As argamassas produzidas foram estudadas no estado livre, isto é, sem aditivos e também dentro da inserção de aditivo orgânico polimérico poli-acetato de vinila (PVA) e o Estireno Butadieno (SBR). As Argamassas obtidas foram caracterizados fisicamente através das análises de porosidade aparente, absorção de água, massa específica aparente e resistência a compressão axial. Também foram realizadas análises térmicas de (TG e DTG) e microscopia eletrônica de varredura - MEV. No estado fluido foram realizados ensaios reológicos a fim de avaliar o seu comportamento conforme o tempo (Tixotropia), trabalhabilidade e o modelo reológico mais representativo para seu escoamento. Os materiais desenvolvidos apresentaram propriedades técnicas aprovadas pelas das normas da ABNT, fazendo com que se adequem a certos tipos de aplicações,

em termos de assentamento e revestimento de paredes, pisos e placas cerâmicas, respeitando as características técnicas destes materiais.

Palavras-chave: Reaproveitamento, Resíduos industriais, Argamassas, Compósitos cimentícios.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D. Eng.)

**INFLUENCE OF INDUSTRIAL WASTE USE ON MECHANICAL AND
RHEOLOGICAL PROPERTIES OF MORTARS USED IN CIVIL
CONSTRUCTION INDUSTRY**

Dilson Nazareno Pereira Cardoso

Advisor: José Antonio da Silva Souza, D. Eng.

Area of Concentration: Use and Transformation of Natural Resources.

The general objective of this work was to develop alternative and usable materials within the construction industry, addressing a logic of recovery and reuse of solid waste, generated from construction and demolition construction sites, as well as the reuse of waste generated from the construction industry mining industry and mineral processing. Were used in the work the residue of construction (RCC), residue of sulfide copper ore (RMCS) and the waste of circulating fluidized bed boilers from the combustion of coal to fly ash (CV). The samples of these materials showed appropriate characteristics, such as recycled fine aggregate within the NBR 7211 standard. The materials were subjected to physical and chemical characterization through laser particle size analysis, x-ray fluorescence (FRX), diffraction and x-ray (DRX).). The mortars produced were studied in the free state, that is, without additives and also within the insertion of polymeric organic additive polyvinyl acetate (PVA) and Styrene Butadiene (SBR). The obtained mortars were physically characterized through the analysis of apparent porosity, water absorption, apparent specific mass and resistance to axial compression. Thermal analyzes of (TG and DTG) and scanning electron microscopy - SEM were also performed. In the fluid state rheological tests were performed to evaluate its behavior according to time (thixotropy), workability and the most representative rheological model for its flow. The developed materials presented technical properties approved by the ABNT standards, making them suitable for certain types of applications, in terms of laying and covering of walls, floors and ceramic tiles, respecting the technical characteristics of these materials.

Keywords: Reuse, Industrial waste, Mortars, Cement composites.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1.1 – Geral.....	1
1.1.2 – Específicos.....	1
1.2 - INTRODUÇÃO.....	2
1.2.1 - Motivações e Objetivos.....	2
1.3 – INEDITISMO.....	4
1.4 - ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 - GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	6
2.2 - RECICLAGEM DE RESÍDUOS E SUA IMPORTÂNCIA.....	6
2.3 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO DO NBR 10004 /2004 E CONAMA N° 307.	8
2.4 – ARGAMASSA.....	9
2.4.1 - Conceitos e Definições.....	9
2.5 - PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....	10
2.5.1 – Elasticidade.....	10
2.5.2 - Retenção a Água.....	11
2.5.3 – Plasticidade.....	11
2.5.4 – Consistência.....	11
2.5.5 - Adesão Inicial.....	12
2.5.6 – Trabalhabilidade.....	12
2.6 - AGREGADOS MIÚDO PARA ARGAMASSAS.....	13
2.6.1 - Classificação dos Agregados.....	14
2.7 - UTILIZAÇÃO AGREGADO MIÚDO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	14
2.7.1 - Resíduo da Indústria da Construção Civil (RCC).....	15
2.7.2 - Resíduo da Indústria de Mineração do Cobre.....	16
2.7.3 - Agregado Pozolânico a Partir do Reaproveitamento do Resíduo do Carvão Mineral de Caldeiras de Usinas Termelétricas Cinza Volante (CV).....	17
2.7.3.1 - Utilização de Cinzas Volantes em Concretos e Argamassas.....	23

2.8 - UTILIZAÇÃO AGREGADO MIÚDO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	26
2.8.1 - Formação do Filme Polimérico.....	27
2.8.2 - Interfase de Interação Entre Aditivo Polimérico e o Cimento Portland.....	28
2.9 – REOLOGIA.....	35
2.9.1 - Reologia Conceitos Gerais.....	35
2.9.2 - Reologia de Pastas Cimentícias.....	36
2.9.3 - Influência de Parâmetros das Argamassas nas suas Propriedades Reológicas.....	40
2.9.3.1 - Morfologia das Partículas.....	40
2.9.3.2 - Influência da Adição de Agregados nas Pastas.....	42
2.10 - APLICAÇÕES DA REOLOGIA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS (CONCRETOS E ARGAMASSAS).....	44
2.10.1 - Argamassas e Concretos Bombeáveis.....	44
2.10.2 - Argamassas e Concretos Projetados.....	47
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 - COLETA E PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS.....	49
3.1.1 - Resíduo da Construção Civil (RCC).....	49
3.1.2 - Processo de Beneficiamento do Resíduo da Construção Civil e suas Caracterizações.....	50
3.1.2.1 - Primeiro Processo - Moagem Primária.....	52
3.1.2.2 - Segundo Processo - Moagem Secundária.....	52
3.1.3 - Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS).....	55
3.1.4 - Caracterização do RMCS a Possíveis Contaminantes (Metais Pesados).....	56
3.1.5 - Cinza Volante (CV).....	56
3.1.6 - Areia Quartzosa.....	57
3.1.7 - Cimento Portland (CP II-E32).....	57
3.1.8 - Caracterização dos Aditivos Poliméricos Poliacetato de Vinila (PVA) e Estireno Butadieno (SBR).....	57
3.2 - EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS UTILIZADAS.....	58
3.2.1 - Análise Granulométrica dos Materiais.....	58
3.2.2 - Medidas das Densidades Relativas ou Real de RCC, CV e RMCS (Através do Método da Picnometria).....	58
3.2.3 - Caracterização Mineralógica.....	59

3.2.3.1 - Difração de raios X (DRX).....	59
3.2.3.2 - Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX).....	60
3.2.3.3 - Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	60
3.2.5 - Análises Térmicas (Curvas TG/DTA e DSC).....	60
3.2.6 - Elaboração dos Corpos de Prova Cilíndricos.....	61
3.2.7 - Procedimento Experimental 01- Proporção de Água Ideal na Mistura.....	61
3.2.8 - Procedimento Experimental 02 – Fabricação dos Corpos de Prova Obtidos Através da Matriz de Experimento Utilizando o RMCS e RCC.....	63
3.2.9 - Procedimento Experimental 03 – Inserção de Polímero PVA e SBR nas Misturas para Fabricação dos Corpos dos Melhores Traços Obtidos Através da Matriz de Experimento Utilizando o RMCS e RCC.....	64
3.2.10 - Caracterização Físico-Mecânica no Estado Endurecido.....	65
3.2.10.1 - Resistência à Compressão.....	65
3.2.10.2 - Absorção Aparente.....	66
3.2.10.3 - Porosidade Aparente.....	67
3.2.10.4 - Massa Específica Aparente (MEA).....	67
3.2.11 - Análises Reológicas.....	68
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS PRIMAS.....	71
4.1.1 - Análise Granulométrica do Resíduo da Construção Civil (RCC).....	71
4.1.2 - Difração de raios X (DRX) do Resíduo da Construção Civil (RCC).....	72
4.1.3 - Espectrofotometria de Fluorescência de raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Resíduo da Construção Civil (RCC).....	72
4.1.4 - Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS).....	74
4.1.4.1 - Análise Granulométrica do Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS).....	74
4.1.4.2 - MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura do Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado.....	75
4.1.4.3 - Difração de raios X (DRX) do Resíduo do Rejeito de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS).....	76
4.1.4.4 - Espectrofotometria de Fluorescência de raios X (FRX) do RMCS.....	76
4.1.4.5 - Classificação dos Resíduos dos RMCS.....	77
4.1.5 - Resultados das Análises de Caracterização da Cinza Volante (CV).....	78

4.1.5.1 - Análise Granulométrica da Cinza Volante (CV).....	78
4.1.5.2 - Difração de raios X da Cinza Volante (CV).....	79
4.1.5.3 - Espectroscopia de Fluorescência de raios X FRX da (CV).....	80
4.1.5.4 - Microscopia Eletrônica de Varredura da Cinza Volante (CV).....	81
4.1.6 - Características Físicas do Cimento Portland (CP 2 E-32).....	82
4.1.7 - Características Físicas e Granulométricas da Areia de Obra Civil.....	83
4.2 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ÁGUA NA MISTURA.....	84
4.2.1 - Análise das Argamassas Produzidas com RMCS nas Relações a/ag de 0,28 e 0,40.....	84
4.2.2 - Análise das Argamassas Produzidas com RCC nas Relações a/ag de 0,28 e 0,40.....	86
4.2.3 - Análise Micro Estrutural das Argamassas para os Resíduos 01 (RMCS) e resíduos 02 (RCC).....	87
4.3 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS DIFERENTES COMPOSIÇÕES NAS MATRIZES DE EXPERIMENTO.....	90
4.3.1 - Resultado das Análises dos Corpos de Prova Obtidos Através da Matriz de Experimento Utilizando o RMCS e o RCC.....	90
4.3.2 - Porosidade Aparente das Argamassas de RMCS e RCC.....	91
4.4 - EXPERIMENTOS 04 - CORPOS DE PROVA ADITIVADOS COM POLÍMEROS PVA E SBR.....	92
4.4.1 - Análise Térmica.....	92
4.4.2 - Resultado das Análises dos Corpos de Prova Aditivados com Polímeros PVA e SBR Utilizando RMCS.....	96
4.4.2.1 - Resultado das Análises dos Corpos de Prova Aditivados com Polímeros PVA e SBR Utilizando RCC.....	99
4.4.3 - Resultado das Análises Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com Polímeros PVA e SBR a Partir do RMCS.....	102
4.4.3.1 - Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RMCS + PVA.....	103
4.4.3.2 - Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RCC + PVA.....	105
4.4.3.3 - Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RMCS + SBR.....	106

4.4.3.4 - Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RCC + SBR.....	107
4.5 - ANÁLISES REOLÓGICAS.....	109
4.5.1 - Influência do Teor de Agregados nas Misturas Água Cimento.....	109
4.5.2 - Curva de Trabalhabilidade.....	110
4.5.3 - Influência da Inserção de Aditivos Orgânicos PVA e SBR na Energia de Agregação (histereses reológicas) das Pastas Elaboradas a Partir do RMCS e RCC.....	111
4.5.4 - Curvas de Fluxos Reológicas.....	113
4.5.4.1 - Curvas de Fluxo Reológicas das Argamassas Confeccionada com RMCS.....	113
4.5.5 - Curvas de Fluxo Reológicas das Argamassas Confeccionada com RCC	117
4.5.6 - Modelos Reológicos.....	120
4.5.6.1 - Modelo Reológico para Argamassas Elaboradas a Partir do RMCS com e sem Aditivos Orgânicos PVA e SBR.....	120
4.5.6.2 - Modelo Reológico para Argamassas Elaboradas a Partir do RCC com e sem Aditivos Orgânicos PVA e SBR.....	121
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	123
5.1 – CONCLUSÕES.....	123
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
APÊNDICE A - MATRIZES E TABELAS DE PROPORÇÃO.....	143
Tabela A.1 - Massa total da mistura para elaboração de 1 corpo de prova.....	143
APÊNDICE B - PESQUISA DE OBSERVAÇÃO DIRETA.....	144
Tabela B.1 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RMCS.....	144
Tabela B.2 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RCC.....	146
APÊNDICE C.....	148
Tabela C.1 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RMCS aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).....	148
Tabela C.2 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RMCS aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).....	148

Tabela C.3 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RCC aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).....	148
Tabela C.4 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RCC aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).....	149
APÊNDICE D.....	150
Tabela D.1 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo de Minério de cobre sulfetado (RMCS) aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).....	150
Tabela D.2 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo de Minério de cobre sulfetado (RMCS) aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).....	150
Tabela D.3 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo da construção Civil (RCC) aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).....	150
Tabela D.4 - Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo da construção Civil (RCC) aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).....	151
APÊNDICE E.....	152
Tabela E.1 - Modos vibracionais com o número de onda correspondentes.....	152
Figura E.1 - Gráfico de FTIR do polímero (PVA).....	152
Figura E.2 - Gráfico de FTIR do polímero (SBR).....	153
ANEXO 01.....	154
Tabela de composição granulométrica de solo. Fonte: ABNT NBR6502/1995.....	154
ANEXO 02.....	155
Fluxograma para a classificação dos resíduos sólidos. Fonte: ABNT - NBR 10004/2004.....	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Mecanismo de formação das cinzas volantes durante a combustão do carvão mineral. Fonte: KNUDSEN, (2001).....	18
Figura 2.2	Partícula esférica de Cinza Volante Fonte: AZEVEDO (2002)...	20
Figura 2.3	Partículas pleosféricas contendo partículas cenosféricas de Cinza volante (CV). Fonte: AZEVEDO, (2002).....	20
Figura 2.4	Difratograma de raio - X da CV apresentando 5 fases mineralógicas com seus principais picos. Fonte: ROCHA JUNIOR et al., (2012).....	22
Figura 2.5	Difratograma com a composição mineralógica CDA e FFA (adaptada). Fonte: SOKOLAR e VODOVA, (2001).....	23
Figura 2.6	Efeito Filer das cinzas volantes. Fonte: AZEVEDO, (2002).....	24
Figura 2.7	Gráfico de Difração de raio - X da Cinza e suas fases cristalinas. Fonte: CHENGALA e CHEN, (2001).....	26
Figura 2.8	Gráfico de análise Térmico (TG) e (DSC) das cinzas volantes. Fonte: CHENGALA e CHEN, (2001).....	26
Figura 2.9	Etapa teórica de formação do filme polimérico em dispersão aquosa tipo látex acrílico. Fonte: BUCKMANN, (2011) adaptado: (A) Partícula de látex dispersas em água aplicadas sobre um substrato, (B) Após o estágio de evaporação da água na mistura ocorre a aproximação das partículas e o início do empacotamento, (C) Consolidação do empacotamento caracterizado pela deformação das partículas, (D) Difusão das cadeias poliméricas ocorrendo a mistura e desaparecimento das bordas.....	28
Figura 2.10	Reação de hidrólise dos grupos orgânicos Acetato de vinila das sequências de PVA do poli (alcool vinílico) em meio alcalino. Fonte: MANSSUR, (2007).....	30
Figura 2.11	Fases do modelo de hidratação do cimento em argamassa dosadas com latex. Fonte: MANSSUR, adaptadas de BEELDENS, et al; (2003).....	32
Figura 2.12	Modelo de formação de compósito de PMM. Fonte: SAKAI e	34

	SUGITA, (1995).....	
Figura 2.13	Modelo esquemático do mecanismo de interação entre Polímeros com grupo carboxilatos, íon Ca +2 liberados na hidratação do cimento e a superfície agregado. Fonte: OHAMA, (1998).....	34
Figura 2.14	Curva de escoamento para um fluido de Bingham. Fonte: FERRARIS, (1996).....	38
Figura 2.15	Avaliação do comportamento reológico (tixotropia) de pastas cimentícias dosadas com diferentes aditivos Fonte: BURAK, (2014) e SENFF, HOTZA, REPETTE (2010) (adaptado).....	41
Figura 2.16	Efeito da inserção de agregado em diferentes granulometrias nos parâmetros reológicos de argamassa. Fonte: GANG, KEJIN, THOMAS (2008).....	43
Figura 2.17	Esquema do Processo de aplicação de pastas cimentícias por projeção a úmido. Fonte: MARQUES, (2004).....	48
Figura 2.18	Ilustração esquemática da palicação de materiais cimentícios com destaque dos quatro aspectos da técnica (a) bombeamento; (b) bocal de projeção; (c) spray e (d) consolidação. Fonte: D. VASQUES FILHO, (2004).....	48
Figura 3.1	Resíduo da construção civil (RCC) em fase de coleta.....	49
Figura 3.2	Ambiente de retirada de matéria prima (RCC) na UFPA.....	50
Figura 3.3	Etapa de beneficiamento da matéria-prima.....	51
Figura 3.4	Britador de mandíbulas, marca (BRITERPA, modelo 1020 - série 08).....	52
Figura 3.5	Moinho de bolas marca CIMAQ (modelo Index série (005).....	53
Figura 3.6	Moinho de disco marca MARCONI (modelo MA 700 série 100690037).....	54
Figura 3.7	Evolução das Etapas de cominuição do resíduo da construção civil (RCC).....	54
Figura 3.8	Vista do ponto de lançamento do resíduo de minério de cobre (A), ponto de coleta do material (B) e material coletado (C). Fonte: MULLER e CASTRO FILHO, (2008).....	55
Figura 3.9	Modelo e dimensão dos corpos de prova Elaborados na	61

	pesquisa.....	
Figura 3.10	Fluxograma das principais etapas experimentais da pesquisa.....	62
Figura 3.11	Prensa hidráulica modelo (EMIC SSH30- célula TRD30) (a) e corpo de prova rompido (b).....	66
Figura 3.12	(a) Corpos de prova em imersão por 24Hs e (b). dispositivo para medição da massa imersa dos cp's.....	66
Figura 3.13	Viscosímetro VT 550 acoplado ao banho térmico.....	69
Figura 3.14	Sistema de medição de viscosidade aparente copo SV e Spindle SV1.....	69
Figura 4.1	Distribuição do tamanho de partícula do resíduo da construção civil (RCC).....	71
Figura 4.2	Difratograma de raios X do resíduo da construção civil (RCC)..	72
Figura 4.3	Microscopia de eletrônica de varredura do resíduo da construção civil (RCC).....	73
Figura 4.4	Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de minério de cobre (RMCS).....	74
Figura 4.5	Microscopia eletrônica de varredura do rejeito de minério de cobre (RMCS).....	75
Figura 4.6	Difratograma do resíduo de minério de Cobre sulfetado (RMCS).....	76
Figura 4.7	Distribuição granulométrica da cinza volante (CV).....	79
Figura 4.8	Difratograma de raios X da cinza volante (CV).....	80
Figura 4.9	Microscopia eletrônica de varredura das amostras de cinza volante (CV).....	81
Figura 4.10	Distribuição granulométrica da areia quartzosa.....	83
Figura 4.11	Gráfico de resistência a Compressão das argamassas produzidas com RMCS entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40.....	85
Figura 4.12	Gráfico de porosidade aparente das argamassas produzidas com RMCS entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40....	85
Figura 4.13	Gráfico de resistência a compressão das argamassas produzidas com RCC entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40.	86
Figura 4.14	Gráfico de porosidade das argamassas produzidas com RCC	87

	entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40.....	
Figura 4.15	Análise micro-estrutural das argamassas fabricadas com resíduo 01(RMCS) – A, B*, C e D**.....	88
Figura 4.16	Análise micro-estrutural da argamassa fabricada a partir do resíduo 02 (RCC) – A, B*, C e D**.....	89
Figura 4.17	Gráfico de resistência a compressão para as argamassas fabricadas a partir do RMCS e do RCC.....	90
Figura 4.18	Gráfico comparativo de porosidade aparente das argamassas fabricadas a partir do resíduo 01 e 02.....	91
Figura 4.19	Termogramas de análise de TG para as pastas aditivadas com PVA e SBR.....	93
Figura 4.20	Termograma de análise das argamassas dosadas apenas com polímero (PVA).....	94
Figura 4.21	Termograma de análise das argamassas dosadas apenas com polímero (SBR).....	94
Figura 4.22	Termograma de análise de DSC das argamassas dosadas com polímero (PVA) e (SBR).....	96
Figura 4.23	Gráfico de resistência a compressão dos melhores traços com RMCS com e sem polímero.....	97
Figura 4.24	Gráfico de porosidade aparente a compressão dos melhores traços com RMCS com e sem polímero.....	98
Figura 4.25	Gráfico de absorção aparente dos melhores traços com RMCS com e sem polímero.....	99
Figura 4.26	Gráfico de resistência a compressão dos melhores traços com RCC com e sem polímero.....	100
Figura 4.27	Gráfico de porosidade aparente dos melhores traços com RCC com e sem polímero.....	101
Figura 4.28	Gráfico de absorção aparente dos melhores traços com RCC com e sem polímero.....	102
Figura 4.29	Análise micro-estrutural da argamassado traço 06 sem aditivo – A, B, C e D diferentes pontos de cristais aciculares de etringita.	103
Figura 4.30	Análise micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RMCS aditivada com PVA: (A), (B) e (C) verificação de	105

	microfissuras no material, (D) depressões de geometria côncava.....	
Figura 4.31	Análise micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RCC aditivada com PVA: (A), (B) formação de uma zona de interfase polímero e agregado, (C), (D) interfase filme polimérico e agregado.....	106
Figura 4.32	Análise Micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RMCS aditivada com (SBR)- (A) Interfase agregado matriz, (B) Quantidade expressiva de poros de pequenos diâmetros e pseudo poros, (C) e (D) Efeito da ancoragem química.....	107
Figura 4.33	Análise micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RCC aditivadas com SBR: (A), (B), (C) e (D) Evolução no aumento da imagem da película polimérica formada na interfase agregado cimento.....	108
Figura 4.34	Influência do teor de resíduos nas viscosidades das pastas.....	110
Figura 4.35	Curva de Trabalhabilidade para os melhores traços do 2ºexperimento.....	111
Figura 4.36	Gráfico de área de histerese reológica para os melhores traços de argamassas confeccionadas a partir do RMCS com e sem Polímero.....	112
Figura 4.37	Gráfico de área de histerese reológica para os melhores traços de argamassas confeccionadas a partir do RCC com e sem polímero.....	113
Figura 4.38	Curvas de fluxo para os traços 06, 08 e 09 fabricados a partir do RMCS em comparação com adição e sem adição de polímero.....	116
Figura 4.39	Curva de fluxo para os traços 01, 03 e 06 fabricados a partir do RCC em comparação com e sem adição de polímero.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química da cinza volante.....	21
Tabela 2.2	Com a composição da argamassa com cinza proveniente do gaseificador. Fonte: CHENGALA e CHEN, (2011).....	25
Tabela 2.3	Tabela de composição química com outros ingredientes cerâmicos encontrados nas cinzas volantes. Fonte: CHENGALA e CHEN, (2011).....	25
Tabela 2.4	Equações que relacionam a tensão e a taxa de cisalhamento para os diferentes modelos reológicos aplicados em pastas cerâmicas e argamassas.....	39
Tabela 3.1	Condição específica de moagem para a etapa de cominuição....	53
Tabela 3.2	Tabela das técnicas de caracterização dos resíduos da construção civil (RCC).....	55
Tabela 3.3	Tabela de determinações para o resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS).....	56
Tabela 3.4	Tabela de determinações para a cinza volante de carvão mineral (CV).....	57
Tabela 3.5	Tabela de determinações físico-químicas dos aditivos PVA e SBR.....	58
Tabela 3.6	Tabela de proporções para as argamassas elaboradas a partir do rejeito de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS).....	64
Tabela 3.7	Tabela de proporções para as argamassas elaboradas a partir do rejeito da construção civil (RCC).....	64
Tabela 3.8	Tabela de melhores parâmetros de avaliação de viscosidade de argamassas.....	68
Tabela 3.9	Principais modelos reológicos avaliados neste trabalho.....	70
Tabela 4.1	Característica Física do resíduo da construção civil (RCC).....	72
Tabela 4.2	Fluorescência de raio - X do resíduo da construção civil (RCC)	73
Tabela 4.3	Características Físicas do resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS).....	75
Tabela 4.4	Análise de Fluorescência de raio -X do RMCS.....	77
Tabela 4.5	Tabela de análise de metais para o resíduo de minério de cobre	78

	sulfetado (RMCS).....	
Tabela 4.6	Caracterização Física da cinza volante (CV).....	79
Tabela 4.7	Análise de Fluorescência de raio - X da cinza volante (CV).....	81
Tabela 4.8	Resultados da caracterização química, física e Mecânica do cimento Portland CP II - E 32.....	82
Tabela 4.9	Caracterização física da areia quartzosa.....	83
Tabela 4.10	Modelos reológicos de Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Power Law para os melhores traços do 2º experimento fabricados a partir do RMCS com e sem aditivo polimérico PVA e SBR.....	121
Tabela 4.11	Modelo reológico de Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Power Law para os melhores traços do 2º experimento fabricados a partir do RCC com e sem aditivo polimérico PVA e SBR.....	122

NOMENCLATURA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
RMCS	Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CV	Cinza Volante
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CFA	<i>Coal Fly Ash</i>
FFA	<i>Fluidized Fly Ash</i>
RCC	Rejeito da Construção Civil
Norsk Hydro SA	<i>Norwegian Aluminium and Renewable Energy Company</i>
K	Índice de consistência (Pa.s ⁿ)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DRX	Difração de raio X
FRX	Fluorescência de raio-X
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
n	Índice de Comportamento do Fluido (adimensional)
η_p	Viscosidade plástica do fluido
γ	Taxa de deformação (s ⁻¹)
τ_0	Tensão limite de escoamento (Pa)
τ	Tensão de cisalhamento (Pa)
Tyler	Escala granulométrica
R ²	Fator de correção
#	Mesh
D ₅₀	Diâmetro Médio da Partícula
a/ag	Relação Água Aglomerante
LCM	Laboratório de Caracterização Mineral
(C-S-H)	Silicato de Cálcio Hidratado
UFPA	Universidade Federal do Pará
PC	<i>Polymer Concret</i>

PMC	<i>Polymermodified Concret</i>
PMM	<i>Polymer Modified Montar</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVA	Poliacetato de Vinila
PA	Porosidade Aparente
AA	Absorção de Água
PRODERNA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia
PVAc	Polimerização do Acetato Vinílico para Poli(acetatovinílico)
SBR	Estireno Butadieno
TG	Termogravimétrico
DTG	Derivada Termogravimétrica
MEA	Massa Especifica Aparente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplica
VAE	<i>Ethylene Vinyl Acetate</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O objetivo geral da pesquisa é propor materiais alternativos e aproveitáveis na indústria da construção civil, abordando uma lógica de valorização e reaproveitamento de resíduos sólidos gerados a partir de canteiros de obras de construção e demolição, bem como de resíduos gerados da indústria de mineração do Cobre.

1.1.2 Específicos

a) Reintroduzir no processo de elaboração de argamassas e resíduo da indústria da construção civil como resto de reboco e concreto demolido (RCC), e da indústria minero metalúrgica, entre eles o resíduo de flotação do cobre (RMCS) e o resíduo da queima incompleta do carvão mineral a cinza volante (CV), como agregado miúdo e pozolânico nas matrizes de elaboração desses materiais.

b) Realizar a caracterizar esses resíduos (RCC), (RMCS) e (CV), e dos aditivos orgânicos PVA e SBR a eles incorporados, utilizando técnicas como (Granulometria a laser, DRX, MEV e FTIR), para avaliar seus potenciais na produção desses materiais alternativos.

c) Elaborar corpos de provas cilíndricos a partir das matrizes confeccionadas e realizar as caracterizações de suas propriedades físicas e mecânicas (resistência a compressão, porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente), térmicas (termogravimétrica), no estado endurecido e reológicas no estado fresco.

d) Efetuar uma avaliação da correlação microestrutura/propriedades, comparando os melhores traços sem aditivo e com aditivo orgânico bem como os materiais geopoliméricos confeccionados.

1.2 INTRODUÇÃO

1.2.1 - Motivações e Objetivos

A disposição inadequada de resíduos é uma das principais causas da degradação do meio ambiente, com potencial de afetar a qualidade de vida da população, o equilíbrio dos ecossistemas e a disponibilidade de recursos naturais. Os resíduos oriundos das atividades da construção civil não são exceção, e podem se tornar parte deste problema caso não lhes seja dado o correto gerenciamento. Mais ainda, sua gestão inadequada representa um grande desperdício econômico, visto que estes não só constituem a maior fração em massa dos resíduos gerados nas cidades, como em muitos casos são compostos em grande parte por material passível de reciclagem ou reaproveitamento (COVAS, 2012).

Com a intensa industrialização, das metrópoles, advento de novas tecnologias, crescimento populacional em centros urbanos e diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos, com um gerenciamento oneroso e complexo considerando-se volume e massa acumulados, principalmente após os anos 80, 90 e 2000. Os problemas se caracterizavam por escassez de áreas de deposição de resíduos causadas pela ocupação e valorização de área urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental (JOHN, 1999; JOHN, 2000; BRITO, 1999; GÜNTHER, 2000; PINTO, 1999).

Logo, no tocante dessa problemática estabelecida, faz-se necessário reciclar os resíduos provenientes dessa atividade. Para isso, necessita-se de mecanismo de gerenciamento e estudo que vão desde sua geração até sua destinação final. Logo a principal motivação que levou ao desenvolvimento do trabalho foi desenvolver produtos a base desse material, no caso uma argamassa aditivada com polímero e produzida com resíduos industriais da construção civil e minero metalúrgica, e com isso chegar a uma contribuição científica dentro da lógica de valorização e reaproveitamento de resíduos sólidos.

Nos anos que antecederam, diversos estudos e pesquisas foram realizadas com a finalidade de tornar a cinza volante aproveitável, na indústria da construção civil do estado do Pará, tendo como base de apoio a UFPA. Dentre esses trabalhos destacam-se:

– TANCREDI (2010) que pesquisou a viabilidade da adição resíduo da queima incompleta do carvão mineral, chamada de cinza volante que ocorre em caldeiras de leito fluidizado nas propriedades do concreto em substituição ao cimento Portland, o que mostrou ser viável o aproveitamento do resíduo.

– SIQUEIRA (2011) estudou a produção e o desempenho de argamassas, fabricadas a partir da incorporação de cinzas volantes, que forneceu valores de desempenho satisfatórios quando comparados com dados de literatura.

– CARDOSO (2014) estudou a influência do teor de cinza volante e resíduo da construção civil na reologia de argamassas de assentamento, onde demonstrou através de ensaios rotacionais, que ocorreram mudanças gradativas do comportamento reopético para tixotrópicos, ressaltando como umas das principais causas o efeito filler e pozolânico proporcionado pelas misturas, obteve também como principais modelos o modelo de Bingham e Herschel-Bulckley como os mais representativos nas formulações estudadas.

– CASTRO (2014) estudou os parâmetros físico-químicos, para produção de argamassas tendo como base resíduos de obras civis e industriais, os resultados mostraram aumento de parâmetros físicos de absorção, porosidade e resistência a compressão axial, nos parâmetros químicos foram confirmados a formação de cristais de Alita e Belita nas composições estudadas no estado endurecido.

– CARVALHO (2014) estudou a influência da inserção de resíduos industriais na confecção de placas cerâmicas pré-moldadas (placas taipadas), a partir de matriz sílico-aluminosa destinadas a construção civil. Seus resultados resultaram em propostas de novas argamassas e a construção de placas destinadas à confecção de painéis utilizáveis na Arquitetura contemporânea da região amazônica.

– MULLER (2016) estudou a reciclagem de lodo de estação de tratamento de água (ETA) na fabricação de agregado sintético em mistura com cinza volante de carvão mineral, apresentando resultados excelentes em termos de análise micro estrutural. Com o controle da composição dos componentes e da temperatura foi possível estabelecer as características do agregado fabricado, de acordo com as demandas da indústria da construção civil.

1.3 INEDITISMO

Na busca por soluções para os rejeitos gerados pelas indústrias da construção civil e indústria mineradora, levando em consideração o seu reaproveitamento na sua própria indústria ou em outros ciclos produtivos a humanidade inspira-se na busca de novas soluções aplicando tecnologias para atender tais necessidades.

Assim, na linha de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia (PRODERRA), as questões relacionadas a reciclagem estão latentes, buscando a inovação, solução, e sustentabilidade o programa estimula a união com da Engenharia química, Engenharia civil e a Engenharia dos materiais, além de outras Engenharias para o surgimento de produtos relacionados a tais necessidades atendendo aspectos técnicos e ambientais.

Nesta pesquisa buscou-se abordar de forma inédita a produção e caracterização de compósitos cimentícios na elaboração de argamassas poliméricas tendo como base o resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS), resíduo da construção civil (RCC) e o resíduo de cinza volante de carvão mineral (CV), associada aos poliméricos Poliacetato de vinila (PVA) e Estireno butadieno (SBR). Confeccionando e avaliando as propriedades físicas (porosidade aparente - PA, absorção de água - AA e massa específica aparente - MEA), mecânicas (resistência a compressão), térmicas (termogravimetria - TGA), mineralógica (difração de raios-X - DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), das matérias primas e dos corpos de prova após a ruptura e reológicas (argamassas no estado fresco).

Logo, este trabalho visa contribuir para encontrar uma viabilidade econômica e ambiental para estes materiais. Os estudos sobre a caracterização destes resíduos sugerem a possibilidade de uma nova alternativa de utilização onde suas propriedades serão observadas e analisadas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta sua estrutura dividida em 6 capítulos e organizado da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Introdução: enfatiza a introdução, os fundamentos das motivações, ineditismo e da proposição dos objetivos que levaram à pesquisa sobre a produção de

argamassa aditivada com polímero e produzida com resíduos industriais da construção civil e minério metalúrgica.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: É abordado na revisão da literatura os resíduos oriundos das indústrias da construção civil e das indústrias minero metalúrgicas, ressaltando a importância da reciclagem desses materiais, principalmente destacando os malefícios gerados pelos resíduos da indústria da construção civil e os problemas gerados, pelo beneficiamento do cobre Sulfetado, apresentando também uma abordagem sobre a reciclagem e utilização da cinza volante, e abordagem das principais aplicabilidades desses materiais como agregado miúdo reciclado na confecções de argamassas.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos: aborda as principais metodologias experimentais utilizadas neste trabalho.

Capítulo 4 - Resultados e Discussões: apresenta os resultados do trabalho fazendo as análises, interpretações e discussões sobre os resultados encontrados

Capítulo 5 - Conclusão: Apresentam-se as conclusões do trabalho baseadas nos resultados apresentados.

Capítulo 6 - Apresenta as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Nas últimas décadas tem sido observado que o Brasil sofreu profundas transformações, as quais tem sido fundamental para o seu crescimento. O processo de crescimento urbano se completou, e com ele muitos mecanismos e instrumentos disciplinadores da intensa atividade urbana e mineral tem surgido, como mecanismo de freio frente ao alto índice de degradação ambiental que os mesmos produzem. Estes mecanismos estão repercutindo de forma direta na indústria da construção civil, e de exploração do setor Mineral.

Em poucos anos a população urbana atingiu os atuais 75% da população brasileira, com 35% concentrada nas cinco maiores regiões metropolitanas. As atividades construtivas e a cadeia de negócios no setor da construção avançam aceleradamente, constituindo atualmente um dos pilares de sustentação da estabilidade econômica diferenciada do país. O crescimento das cidades brasileiras vem sendo acompanhado, no último período e com certo atraso, por instrumentos de disciplinamento do processo urbano – são exemplos o Estatuto das Cidades, a Política Nacional de Saneamento Básico e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (COVAS, 2012).

2.2 RECICLAGEM DE RESÍDUOS E SUA IMPORTÂNCIA

Nas últimas décadas, devido às questões ambientais e econômicas, a reciclagem dos resíduos da construção civil vem ganhando mais importância e, por esse motivo, estão sendo desenvolvidas pesquisas e proposições de normatização em muitos países, entre os quais se encontram: Holanda, Dinamarca, Estados Unidos, França, Itália, Rússia e Brasil (NENO, 2010).

No geral, a indústria da construção civil, é responsável por diferentes obras e serviços tais como: edificações industriais, infraestrutura de portos e aeroportos, construções comerciais e residenciais, dentre outros. No tocante momento, o Brasil há alguns anos vem desenvolvendo programas que buscam suprir o déficit habitacional.

Todos esses fatores citados trazem consigo uma problemática que se intensifica a cada ano que é a geração de resíduos.

De acordo com a resolução do CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, conselho nacional de meio ambiente, é considerado um marco regulatório da gestão dos resíduos da construção civil pois estabelece as principais diretrizes, critérios e procedimentos em termos de reciclagens de RCC. Neste contexto a norma define como resíduo da construção civil como:

Resíduo da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (CONAMA, 2002, p. 571).

Cabe observar que a mesma Resolução conceitua e define um agregado reciclado como:

O material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresente características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia (CONAMA, 2002, p. 571).

Segundo PINTO (1999), as principais técnicas utilizadas no processo de reciclagem dos RCC são: triagem inicial, homogeneização, trituração, extração de materiais Orgânicos e metálicos, eliminação de contaminantes e estocagem.

Na indústria da mineração a quantificação do volume destes resíduos sólidos gerados pela atividade de mineração é difícil devido à complexidade e à diversidade das operações e das tecnologias utilizadas nos processos de extração e beneficiamento das substâncias minerais. Desta forma, os resíduos devem ser dispostos em locais adequados e em condições ambientalmente seguras (IPEA, 2012).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO DO NBR 10004 /2004 E CONAMA N° 307

Em se tratando de políticas de controle de resíduos sólidos, a legislação brasileira prevê dois tipos de sistemas de controle que classificam os resíduos sólidos gerados pelas: a NBR 10004 -2004, que é definida pela associação brasileira de normas técnicas (ABNT) e a resolução do CONAMA 307, que é definida pelo conselho nacional de meio ambiente.

A NBR 10004 /2004, prevê que os resíduos sólidos gerados pela indústria da construção civil sejam divididos em dois grupos sendo que essa divisão se dá em relação ao potencial do resíduo sólido causar risco a saúde humana e ao meio ambiente:

- Resíduo perigoso (resíduo classe I) – apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade química, toxicidade ou patogenicidade;
- Resíduos não perigosos (resíduos classe II) – estes tipos de resíduos que não apresentam perigo ainda podem ser subdivididos em:
 - Resíduo não – inerte (resíduo classe II – A) – São resíduos que tem alguns de seus constituintes solubilizados em água destilada ou deionizada a temperatura ambiente quando em contato dinâmico ou estático, essas concentrações são superiores aos padrões aceitos pelos padrões de potabilidade da água.
 - Resíduos inertes (classe II-B) – são considerados como qualquer resíduo que não tem seus constituintes solubilizados em água destilada ou deionizada a temperatura ambiente, quando os mesmos entram em contato dinâmico ou estático, não alterando o padrão de potabilidade dessa água.

A resolução estabelecida pelo CONAMA 307 tem como principal objetivo a gestão de resíduos oriundos da indústria da construção civil, e divide os resíduos sólidos em função de seu reuso e valorização de seu reaproveitamento direto, ou seja, através de um processo de reciclagem. Nesse contexto o resíduo sólido é dividido em 04 diferentes classes:

- Resíduos classe A: são resíduos passíveis de serem reutilizados ou reciclados na forma de agregados para fins estruturais, neste contexto engloba-se os entulhos de construção e materiais de terra-planagem;

- Resíduos da classe B: são resíduos passíveis de reciclagem que se destinam a outro tipo de destinação, dentre esses se destacam: plástico, vidro, gesso, papel restos de madeira e metais;
- Resíduos da classe C: são resíduos que atualmente não existem tecnologias desenvolvidas para o seu reuso, ou algum tipo de aplicação economicamente viável que viabilizem sua reciclagem;
- Resíduos classe D: Estes tipos de resíduos são considerados perigosos pois são oriundos de construção, que se destacam: solventes orgânicos de tintas, vernizes, tintas, óleos ou materiais contaminados com os mesmos (pinceis, rolos e EPI's), ou produtos que contenham amianto ou outros tipos de substâncias prejudiciais a saúde.

Concretos e argamassas no estado endurecido, são considerados não perigosos e inertes pela NBR 10004 /2004 e pelo CONAMA 307 como resíduo de classe A.

2.4 ARGAMASSA

2.4.1 Conceitos e Definições

A argamassa pode ser considerada uma mistura homogênea complexa de materiais orgânicos (polímeros) ou inorgânicos (agregado miúdo), e produtos especiais a ela incorporados chamados de aglomerantes (cimento Portland), que se tornam ativos na presença de água, além de materiais especiais chamados de aditivos, que podem variar as suas características físicas e químicas de acordo com a sua utilização. A mistura destes constituintes em proporções estudadas deve ser homogênea de acordo com o tipo de argamassa pretendida (SABBATINI, 1984).

Segundo WARREN (1999), a argamassa pode ser caracterizada como uma rocha artificial, em que em sua constituição estão presentes outras rochas com menor granulometria. Esse sistema está agregado a um ligante que mantém a forma geométrica do conjunto em que foi colocado e confere sua solidez.

Fisicamente as argamassas distinguem-se por apresentarem características plásticas e adesivas quando aplicadas em uma superfície e por tornarem-se rígidas e resistentes após um período. Estes fatores determinam seus principais empregos na construção civil (GASTALDINI e ISAIA, 1999).

A norma NBR 13529 (ABNT, 1995) define argamassa para revestimento como sendo uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento. Nesta mesma norma são definidos outros termos usuais envolvendo o revestimento executado à base de cimento e cal. Neste contexto encontram-se definições como:

- Adições: materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração na proporção;
- Argamassa de cal: argamassa preparada com cal como único aglomerante;
- Argamassa de cimento: argamassa preparada com cimento como único aglomerante;
- Revestimento: é o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera comum a uma ou mais camadas sobrepostas de argamassa, em espessura normalmente uniforme, apta a receber um acabamento final.

De acordo com Ribeiro *et al.* (2002), as aplicabilidades das argamassas estão ligadas de forma direta com os aglomerantes que são empregados a ela, bem como a granulometria da areia e a quantidade de água adicionada na mistura.

Uma argamassa de qualidade deve ser elaborada e produzida para obter o melhor desempenho e durabilidade. Deve-se ter como enfoque algumas propriedades, tais como: baixo custo de mercado, plasticidade, aderência no estado fresco e endurecido, ausência de fissuras, resistência à abrasão, compressão e boa trabalhabilidade (SCANDILARA, 2010).

2.5 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

2.5.1 Elasticidade

De acordo com SABBATINI (1984), a elasticidade é a propriedade que a argamassa possui em se deformar quando já no estado endurecido, sem que ocorra ruptura da sua estrutura quando a ela for solicitado um esforço. Portanto a elasticidade é uma propriedade que pode indicar a ocorrência de fissura no revestimento, influenciando sobre o grau de aderência da argamassa a sua base (CINCOTTO *et al.* 1995).

2.5.2 Retenção a Água

A retenção de água é a capacidade que a argamassa possui quando se encontra no estado fresco de manter constante sua trabalhabilidade ou consistência, quando a ela ocorrem solicitações que causem perda de água, essas perdas podem ser por hidratação do cimento, por evaporação ou por sucção do substrato (CINCOTTO *et al*; 1995).

2.5.3 Plasticidade

É a propriedade que a argamassa possui em continuar deformada mesmo após a redução das tensões de deformação. Segundo CINCOTTO *et al*; (1995), a plasticidade e a consistência, quando influenciadas por fatores como teor de aglomerante, teor de ar incorporado e intensidade de mistura, caracterizam a trabalhabilidade do produto.

De acordo com CASCUDO *et al*; (2005), para se chegar a uma plasticidade adequada para cada aplicação e finalidade, a argamassa deve possuir uma quantidade ótima de água, sendo que esta função está ligada a proporcionalidade em que os materiais estão distribuídos na mistura.

2.5.4 Consistência

Segundo CINCOTTO *et al*; (1995), é a propriedade que a argamassa apresenta em resistir a deformação quando a mesma encontra-se no estado fresco. Essa característica classifica as argamassas em:

- Secas - a pasta preenche os vazios entre os grãos;
- Plástica – a pasta atua como lubrificante, isto é, forma uma fina película na superfície dos grãos dos agregados;
- Fluidas – os grãos que constituem o sistema ficam imersos na pasta.

De acordo com SELMO (1989), a consistência, é determinada de forma direta pelo conteúdo de água, essa propriedade é influenciada por fatores como: natureza e quantidade do aglomerante, granulometria da areia, relação aglomerante/areia, relação água/aglomerante.

O comportamento reológico das argamassas pode ser avaliado atualmente por equipamentos sofisticados (viscosímetros rotacionais), fornecendo parâmetros que são

de fundamental importância nessa avaliação como (viscosidade e tensão de cisalhamento) (BAUER *et al.*; 2005).

2.5.5 Adesão Inicial

De acordo com ROSELLO (1976), a adesão inicial deve-se, em princípio, às características reológicas da pasta aglomerante; a baixa tensão superficial, sendo função inversa do consumo de aglomerantes, o que propicia a sua adesão física ao substrato, assim como aos próprios grãos do agregado miúdo.

Para CINCOTTO *et al.*, (1995), adesão inicial da argamassa no estado fresco ao substrato é a propriedade que caracterizará o comportamento futuro do conjunto substrato/revestimento quanto ao desempenho decorrente da aderência.

2.5.6 Trabalhabilidade

De acordo com TATTERSALL (1991), trabalhabilidade é uma palavra que se refere às propriedades das massas cimentícias quando no estado fresco, indicando a capacidade de ser trabalhada. Para SABBATINI (1984), esta propriedade está ligada a consistência, e pode-se dizer que a trabalhabilidade é a maior ou menor facilidade de se manusear a argamassa. Uma observação importante é que uma argamassa é trabalhável quando ela possui característica homogênea quando assentada, não aderindo a ferramentas quando aplicada e continuar plástica o tempo suficiente até o fim da aplicação, não ocorrendo também o fácil endurecimento quando está em contato com superfícies que absorvam água e não segregando ao ser transportada.

Segundo CASCUDO *et al.*, (2005), quantificar e prescrever características de trabalhabilidade é uma tarefa bastante complexa, uma vez que ela não depende somente das características que são intrínsecas do material, mas também do profissional que irá manipular o material e das propriedades do material em que ela será aplicada.

Devido às muitas limitações encontradas para analisar os fatores de trabalhabilidade, diversas metodologias de ensaios mais objetivos foram desenvolvidas ao longo do tempo. Além disso, a natureza composta dessa propriedade e a sua dependência do tipo de construção e dos diversos métodos de lançamento, adensamento e acabamento das superfícies são os motivos em que nenhum método de ensaio único pode ser projetado para medir essa propriedade (CASTRO, 2007).

Entre os diversos tipos de métodos desenvolvidos para medir a trabalhabilidade estão: a mesa de consistência (NBR 13276/98), o ensaio de penetração *Kelly Ball* (ASTM C 360/92), o ensaio de abatimento de tronco de cone (NBR NM 67/98), o consistômetro de Ve-Be (DNER –ME 094/94) e o fator de compactação (ACI Standart 211.3). Embora esses métodos de ensaios sejam muito úteis para a avaliação da qualidade dos concretos e argamassas, eles são em grande parte, medidas qualitativas, sendo baseados em escalas definidas empiricamente (SAAK *et al*; 2004).

2.6 AGREGADOS MIÚDO PARA ARGAMASSAS

Na elaboração das argamassas a escolha dos agregados é de fundamental importância, pois no estado fresco eles desempenham um papel fundamental na determinação da trabalhabilidade das misturas das argamassas e concreto e do custo, quando no estado endurecido eles podem influenciar na durabilidade do material, na estabilidade dimensional e na resistência mecânica. Nesse sentido é de extrema importância se conhecer macroscopicamente sua forma e sua textura superficial, buscando melhorar e aumentar a junção entre a pasta de cimento, melhorando também a resistência mecânica de acordo com o seu uso (CASTRO, 2007).

Segundo METHTA e Monteiro (2008), fatores como a composição mineralógica dos agregados afeta a resistência, a compressão, dureza, modulo de elasticidade e durabilidade que por sua vez, interferem nas propriedades dos concretos e argamassas quando no estado endurecido.

No processo de formulação das massas cimentícias (concretos e argamassas), deve-se empregar uma granulometria adequada e constante. Pelo contrário pode resultar na variação da trabalhabilidade que ao serem corrigidas, podem variar a quantidade inicial de água na mistura, podendo ocasionar diferentes pontos de resistência nos corpos de prova (NEVILLE, 1995).

De acordo com Silva (2000), o fator de forma das partículas dos agregados influencia de forma direta nas pastas de cimento, mais especificadamente no estado fresco do que no estado endurecido. Esse fato é explicado devido ao entrelaçamento mecânico, a ligação da matriz pasta de cimento e agregado.

No caso do agregado miúdo utilizado nas argamassas, sua forma e textura têm efeito significativo sobre a demanda de água de uma mistura; enquanto no concreto a

lamelaridade e a forma do agregado graúdo geralmente tem um efeito que é observado na trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1995).

Para CASTRO (2007) a quantidade e o tipo de agregado desempenham um papel importante na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, em particular para a produção de concreto de alto desempenho, com baixa relação água/aglomerante. Os agregados possuem um efeito principal na reologia do concreto, aumentando consideravelmente tanto a viscosidade plástica quanto a tensão de escoamento.

Historicamente a utilização de agregados dispersos na massa de cimento aconteceu por razões econômicas, já que estes empregavam um menor custo que o cimento. No entanto, a sua adição acrescentou outras vantagens, nomeadamente técnicas, pois em geral o agregado é mais resistente que a matriz de cimento e confere ao conjunto maior estabilidade e durabilidade (NEVILLE, 1975). Numa monomassa, a areia tem como principal função reduzir a retração e melhorar a resistência mecânica (MASCARENHAS, 2003).

2.6.1 Classificação dos Agregados

Os agregados, quanto a sua origem, podem ser classificados como:

- Agregados naturais – aqueles que se encontram depositados em jazidas nas condições de emprego imediato, como, por exemplo, as areias e os seixos obtidos dos leitos dos rios;
- Agregados artificiais – aqueles em que ocorrem alterações da maneira como se encontram depositados, sem que, no entanto, se verifique qualquer alteração da composição mineralógica das matérias-primas. São exemplos de agregados artificiais, a pedra britada e a argila expandida;
- Agregados industrializados – aqueles que passam a condição de agregado após intervenções que provocam a alteração da composição mineralógica das matérias-primas, como, por exemplo, a escória de alto-forno.

2.7 UTILIZAÇÃO AGREGADO MIÚDO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Os bens minerais têm uma importância significativa para a sociedade, na qual nenhuma civilização pode prescindir do seu uso, principalmente, quando se pensa em

qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano são atendidas essencialmente por estes recursos (KUMMER *et al*; 2007).

O processo de reciclagem de resíduos gerados pelas indústrias para uso como material alternativo não é novidade, e tem sido feito com efetivo sucesso em outros países. A indústria de construção civil é o ramo da atividade tecnológica que, pelo grande volume de recursos naturais consumido, parece ser bastante indicado para absorver tais resíduos sólidos (COIMBRA *et al*; 2004).

As adições minerais incorporada ao cimento não é um processo recente, originalmente incorporando pozolanas naturais a mistura e algum tempo depois, cinzas industriais, com propriedades semelhantes as primeiras. As pesquisas pioneiras com cinzas residuais datam de 1930 nos Estados Unidos (GARCIA *et al*; 2006).

2.7.1 Resíduo da Indústria da Construção Civil (RCC)

Os resíduos de construção civil (RCC) representam 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Uma estimativa aponta para um montante de 68,5 milhões de toneladas por ano, visto que 137 milhões de pessoas vivem no meio urbano. A maioria dos países no mundo investe num sistema formal de gerenciamento para reduzir a deposição ilegal e sistemática, que causam assoreamento de rios, entupimento de bueiros, degradação de áreas e esgotamento de áreas de aterros, além de altos custos socioeconômicos, especialmente em cidades de médio e grande porte (ANGULO, 2005).

De acordo com estudos de Amorim *et al.*, (1999), as argamassas com RCC possuem desempenho mecânico satisfatório, tornando a reciclagem de resíduos bastante promissora, capaz de produzir elementos construtivos de baixo custo.

Os RCC'S, ao passarem pelo processo de cominuição e moagem, podem apresentar atividade pozolânica e serem utilizados com a cal ou como substitutos parciais do cimento Portland na produção de grout, argamassa e concreto (FARIAS FILHO *et al*; 2006).

De acordo com pesquisa realizada por LEITE (2001), o mesmo ressalta-se que as taxas de absorção dos agregados reciclados são bastante elevadas e, deste modo, há a necessidade de compensa-las durante a produção dos concretos para que não haja diminuição excessiva da água livre das misturas de concreto produzidas com agregados reciclados, fato este que comprometeria a trabalhabilidade. Outro fator relevante é o de

que a resistência à tração dos concretos com agregados reciclados é inversamente proporcional à dimensão do agregado reciclados utilizado, em virtude da fragilidade inerente ao material.

Nos trabalhos de LEVY (2001), confirmam-se que a inserção de resíduos de concreto e alvenaria até o teor de 20%, não afeta o comportamento do concreto em relação ao de referência (sem resíduo), demonstrando que poderão ser utilizados sem qualquer restrição quanto a resistência e a durabilidade.

2.7.2 Resíduo da Indústria de Mineração do Cobre

O processo de início de formação dos resíduos da mineração do cobre ocorre na etapa de flotação e posteriormente esse material fica acondicionado em barragens.

Predominantemente chamado de resíduo de minério de cobre sulfetado, suas características mineralógicas predominantes são: calcopirita, bornita e calcocita. Os minérios sem valores (gangas) são formados por silicatos e magnetita, presentes também óxidos e carbonatos em menores quantidades.

A composição do resíduo de cobre sulfetado é formada por sílica, óxido de ferro e óxido de alumínio, ocorrendo nas formas: SiO₂ (57,6 %); Al₂O₃ (12%); Fe₂O₃ (13,7%); MgO (4,1%); CaO (4,37%); Na₂O (2,79 %); K₂O (1,69%); TiO₂ (0,42%); P₂O₅ (0,77%) e MnO (0,04%).

Segundo a NBR 10004/2004 este material classifica-se em resíduo sólido, de nível II B (inerte), porém não podendo ser descartado na rede pública de esgoto.

SANGHAMITRA *et.al.*, (2016) pesquisaram o RCMS em concreto para a indústria da construção civil, com objetivo de utilização para os rejeitos acumulados por várias décadas em Khetri, Rajastão, Índia. Avaliando a eficácia da técnica de solidificação de estabilização utilizando 10 a 15% de rejeito de cobre sulfetado durante os testes de resistência à compressão o concreto demonstrou resultados aceitáveis. Onde o concreto também foi efetivo na imobilização dos elementos lixiviáveis presentes no resíduo.

Os resultados mostraram que o resíduo de cobre sulfetado pode ser utilizado adequadamente em concreto dentro de 10% do teor de cimento em massa e curá-lo por um período igual ou superior a 28 dias, para garantir melhores resultados na estabilização/solidificação da composição química (SANGHAMITRA *et al.*, 2016).

MOURA *et.al.*, (2004) ressalta que a exploração desordenada de recursos não-renováveis e seus impactos ambientais motivaram a utilização de escória de cobre, localizada no Pólo Petroquímico de Camaçari, na Bahia, possuindo a mesma composição química do rejeito da mina do Sossego: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ cerca de 84,3%.

Para MOURA *et.al.*, (2004) os resultados de lixiviação e solubilização evidenciaram que a escória de cobre pode ser classificada como não inerte classe II. Empiricamente, não ocorreu alteração na relação água/cimento dos concretos com adição da escória. Nos testes de absorção por imersão foi reduzida nos concretos contendo a escória, diminuindo também o índice de vazios. Menor porosidade, com uma melhor distribuição, reduzindo a formação de capilares.

SILVA, *et al.*, (1994), desenvolveram uma pesquisa utilizando os resíduos da escória empregada como abrasivo no jateamento de estaleiros no Rio de Janeiro, como agregado miúdo para argamassa e concreto e pré-moldados. Os resultados mostraram que as argamassas produzidas com a utilização de escória de cobre como agregado miúdo apresentaram um melhor desempenho em relação às convencionais, chegando a aumentar em 7% a resistência à compressão axial. O desempenho deste resíduo no concreto também foi comparável ao da areia.

Nas pesquisas realizadas por SOUZA, (2010), inicialmente testes de lixiviação conduzidos em amostras de rejeito, por ocasião do Estudo de Impacto Ambiental da Mina do Sossego no Município de Canaã dos Carajás no Estado do Pará, os resultados indicaram concentrações muito baixas para metais lixiviados considerados significativos, a saber: antimônio, mercúrio, arsênio, prata, selênio, cádmio, cobalto, cromo, tálio, chumbo e urânio.

A partir dessa avaliação vários estudos foram realizados, para utilização destes resíduos. Alguns destes para a utilização de resíduo do beneficiamento de cobre como matéria-prima na fabricação de concreto para ser aplicado diretamente na construção civil.

2.7.3 Agregado Pozolânico a Partir do Reaproveitamento do Resíduo do Carvão Mineral de Caldeiras de Usinas Termelétricas Cinza Volante (CV)

A obtenção cinza volante ocorre pela queima do carvão mineral em usinas termelétricas e contém alto teor de sílica e alumina. O seu mecanismo de formação

ocorre durante a etapa de combustão do carvão pulverizado, quando o carvão passa pela zona de alta temperatura do forno. A matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto a maior parte das impurezas minerais, tais como as argilas, o quartzo, e o feldspato, fundem-se a alta temperatura. O material fundido é rapidamente transportado para zonas de temperatura mais baixa, onde se solidifica em partículas esféricas de vidro. Parte da matéria mineral aglomera formando cinza de grelha, mas a maior parte dela é arrastada pela corrente de exaustão do gás e é chamada de cinza volante (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O processo de formação das cinzas volantes, está intimamente ligada a um mecanismo complexo, que ocorre durante a combustão do carvão mineral e as condições em que ocorrem essa combustão. Muitos fatores alteram a produção das cinzas, criando vapores, fumos e partículas com geometrias maiores com diversas composições em sua constituição (GUPTA, *et al*; 1998).

Os constituintes sólidos que estão presentes no carvão mineral têm a capacidade de formar cinzas durante a sua combustão. Estes constituintes estão muitas vezes presentes como partículas minerais inclusas, isto é, estão dispersas no combustível sem apresentar ligações químicas com a matriz. A Figura 2.1 apresenta o mecanismo de formação das cinzas volantes, através de uma distribuição bimodal relacionada a granulometria (tamanho) das cinzas, a partir do modelo proposto por (KNUDSEN, 2001).

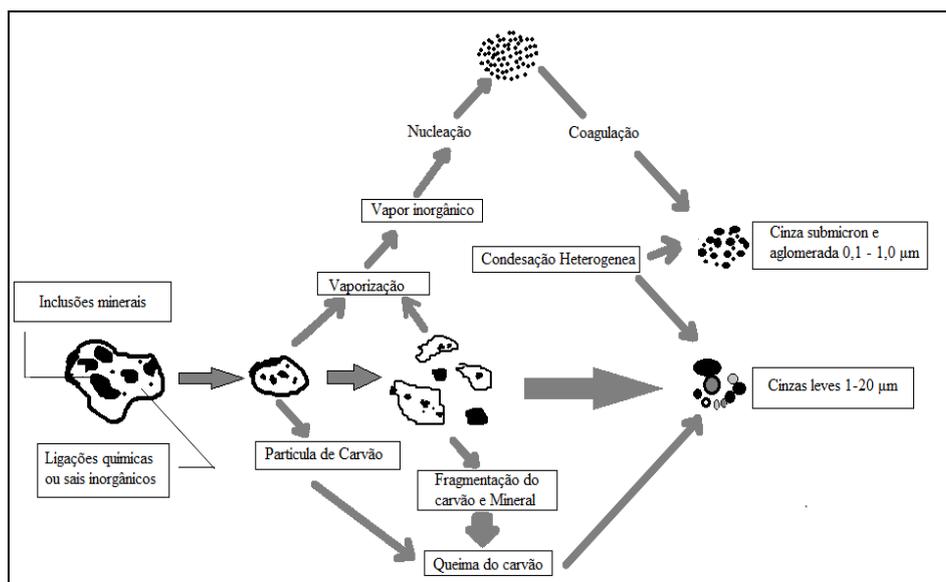


Figura 2.1 - Mecanismo de formação das cinzas volantes durante a combustão do carvão mineral. Fonte: KNUDSEN, (2001).

A primeira etapa do processo, refere-se à formação de partículas de cinza com diâmetros superiores a $1\mu\text{m}$. Essa etapa engloba a fragmentação do carvão mineral, seguida pela união dessas partículas com auxílio dos vapores orgânicos gerados.

A segunda etapa corresponde as sub-etapas de nucleação, condensação e coagulação dos vapores dos sais alcalinos que estão presentes no carvão, gerando assim partículas submicrométricas (BAXTER, 1993).

A caracterização das cinzas volantes em termos de composição mineralogia, superfície e reatividade química é de fundamental importância no desenvolvimento de várias aplicações tecnológicas. Elas possuem, fisicamente a forma de pó. Isto é são constituídas de partículas finas (MATTIGOD *et al.*, 1990).

Normalmente, suas dimensões variam no intervalo de $1\mu\text{m}$ a $150\mu\text{m}$ de diâmetro devido a essas características granulométricas não há necessidade que ocorra a operação cominuição para o seu uso (EROL, 2000).

De acordo com a norma ASTM C618, as cinzas volantes são classificadas em duas categorias: cinzas volantes Classe C e Classe F. A cinza volante é um material complexo formado pela combinação de fases amorfas ou vítreas (60-90%) e fases cristalinas. As cinzas volantes são compostas principalmente por silicatos (SiO_2 , 35-60%), alumina (Al_2O_3 , 10-30%), óxidos de ferro (Fe_2O_3 , 4-20%) e de cálcio (CaO , 1-35%).

As cinzas volantes são constituídas de partículas esféricas, como pode se verificara na Figura 2.2, que são basicamente de dois tipos: sólidas e ocas (cenosferas ou pleosferas), de acordo com a Figura 2.3. São essencialmente vítreas (80% em constituição), apresentando finura elevada. Alguns tipos de cinza volante apresentam partículas com geometrias irregulares. A maioria das partículas possui um diâmetro que está compreendido no intervalo de $1\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$, podendo apresentar uma elevada ou uma baixa granulometria do que as do cimento. O diâmetro médio que as cinzas volantes apresentam está no intervalo de $7\mu\text{m}$ e $12\mu\text{m}$ o que é semelhante do cimento (JOSHI e LOHITA, 1997).

Segundo os trabalhos de ALONSO e WESCHE (1991), as superfícies específicas, calculadas pelo método de Blaine, apresentam variação entre $250\text{m}^2/\text{Kg}$ a $550\text{m}^2/\text{kg}$.

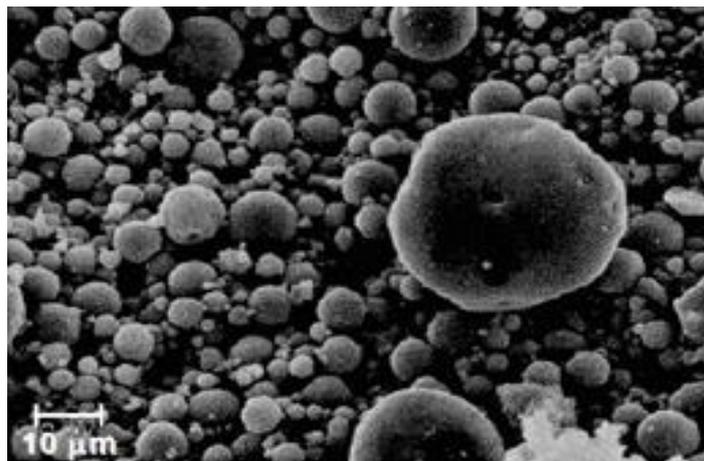


Figura 2.2 - Partícula esférica de Cinza Volante Fonte: AZEVEDO (2002).

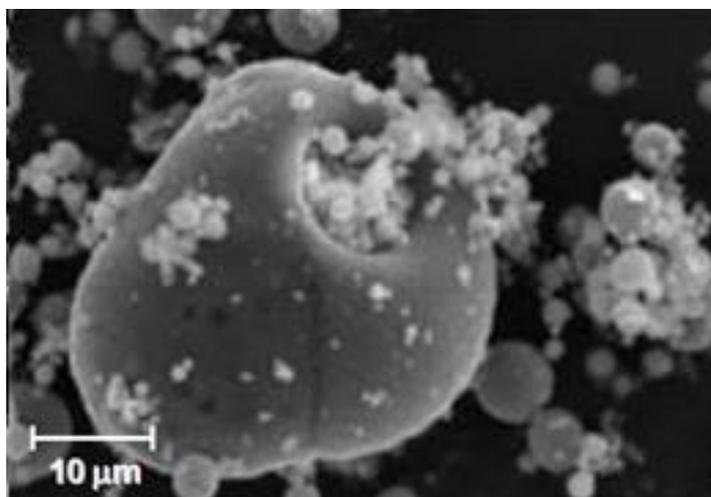


Figura 2.3 - Partículas pleosféras contendo partículas cenosféricas de Cinza volante (CV). Fonte: AZEVEDO, (2002).

Segundo JALALI, (1991) e NEVILLE, (1995), apesar de não haver um acordo quanto a forma mais eficaz de medir a granulometria das cinzas, é consensual que a maioria das partículas finas possuem uma intensa atividade pozolânica. Como a maioria das reações químicas ocorrem com maior área específica é explicável que a atividade pozolânica seja dependente da área disponível para que ocorra a reação.

As cinzas volantes que apresentam a forma esférica possuem vantagem em relação ao teor de água incorporado, pela facilidade de hidratação das partículas e indica que esse material apresenta uma elevada reatividade com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 1995).

As propriedades químicas de cinzas volantes são influenciadas pelas propriedades do carvão mineral e das técnicas utilizadas para manuseio e

armazenamento. Existem basicamente quatro tipos de carvões minerais, que variam de acordo com o seu poder calorífico, a sua composição química, teor de cinzas geradas e origem geológica. Os quatro tipos de carvão são antracite, betuminoso, sub-betuminoso e linhite. Além de serem classificadas em uma forma seca ou úmidas, as cinzas volantes são classificadas de acordo com o tipo de carvão que foi derivada (AHMARUZZAMAN, 2010).

As características pozolânicas das cinzas volantes estão intimamente relacionadas com o teor de SiO_2 , como mostra a Tabela 1, a sílica amorfa que reage com a cal livre e água dá origem a quantidades suplementares de C-S-H. Para uma cinza volante ser inativa em relação às características pozolânicas elas devem possuir o teor de SiO_2 inferior a 35%. Esses tipos de cinzas volantes são inviáveis para serem incorporadas em concretos e argamassas (ALONSO e WESCHE, 1991).

Segundo AITCHIN, (1998) e MALHOTRA, (1999), nem todas as cinzas volantes são viáveis e adequadas para serem usadas nos concretos e argamassas. No entanto, é possível intervir nas suas características, melhorando determinadas características técnicas de separação, suspensão e moagem, que podem beneficiar o desempenho das cinzas. Transformar cinzas não conformes em cinzas aptas para aplicação em concretos e fazer com que cumpram os requisitos normativos, notadamente em relação à finura e ao teor de sólidos.

Tabela 2.1 – Composição química da cinza volante.

Óxidos dos elementos	(%) em peso
SiO_2	57,13
Al_2O_3	34,24
Fe_2O_3	2,78
CaO	2,84
MgO	0,91
TiO	0,91
K_2O	0,65

Segundo os trabalhos ROCHA JUNIOR *et al.*, (2012), verificou-se que a cinza utilizada em seu estudo apresenta quartzo como fase mineralógica principal em sua constituição, bem como se identifica a presença de outras fases presentes, como albita ($\text{AlNaO}_8 \text{Si}_3$), hematita ($\text{Fe}_2 \text{O}_3$), anidrita (CaSO_4), calcita (CaCO_3) e muscovita ($\text{KAl}_2 \text{Si}_3 \text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), sendo estas frequentemente encontradas em cinzas de carvão mineral. A presença de anidrita na cinza volante está intimamente ligada ao processo de dessulfuração interna utilizado durante a queima do carvão mineral, onde há a inserção

de calcário (CaCO_3) ao longo desta queima, a fim de diminuir as emissões de gases SOx para a atmosfera, conforme as reações apresentadas nas equações 2.1 e 2.2.



O autor conclui que algumas fases identificadas na cinza volante estão relacionadas a temperatura utilizada durante a combustão do carvão, sendo que para processos a temperaturas inferiores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$, algumas fases cristalinas ou amorfas presentes originalmente no carvão se mantêm durante todo o processo, uma vez que estas temperaturas não são suficientes para destruir essas estruturas. Como por exemplo, o quartzo, hematita, albita e muscovita. Tal fato justifica a presença destes minerais no difratogramas da Figura 2.4, abaixo.

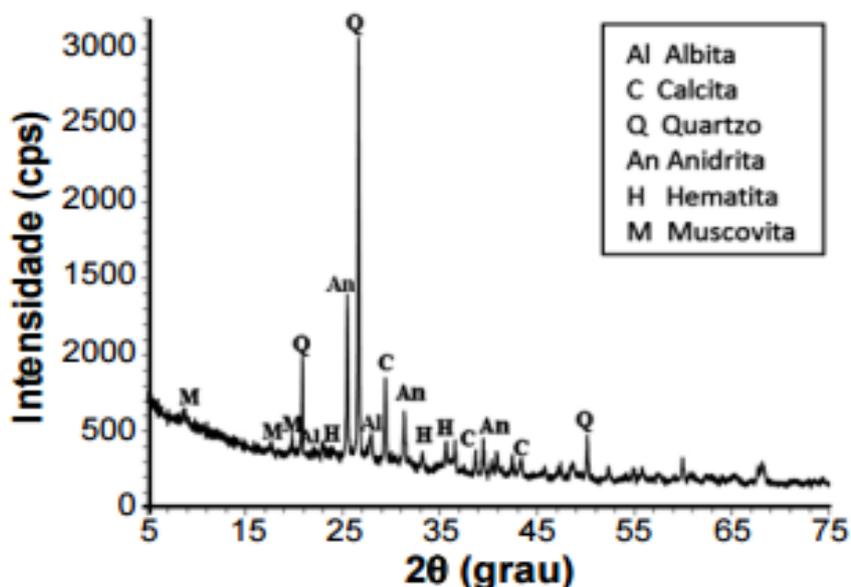


Figura 2.4 - Difratograma de raio - X da CV apresentando 5 fases mineralógicas com seus principais picos. Fonte: ROCHA JUNIOR *et al.*, (2012).

SOKOLAR e VODOVA (2011), analisando dois tipos distintos de amostras de cinza volante de carvão queimado à alta temperatura (CFA), proveniente da Usina Térmica de Melnik, na República Checa e a cinza volante fluidizada (FFA) proveniente da usina térmica de Hodonin também localizada na República Checa, ao analisarem os difratogramas do DRX das amostras Figura 2.5, chegaram à conclusão que composição

mineralógica das cinzas, onde CFA apresenta a fase vítrea como componente principal (80%) e 20% de mullita, a quantidade de SO_3 apresenta valor abaixo de 1%, uma vez que o Sulfato de Cálcio se decompõe na temperatura acima de 1150°C . FFA apresentou a maior quantidade de SO_3 na forma de CaSO_4 , CaO (15%) e calcita CaCO_3 .

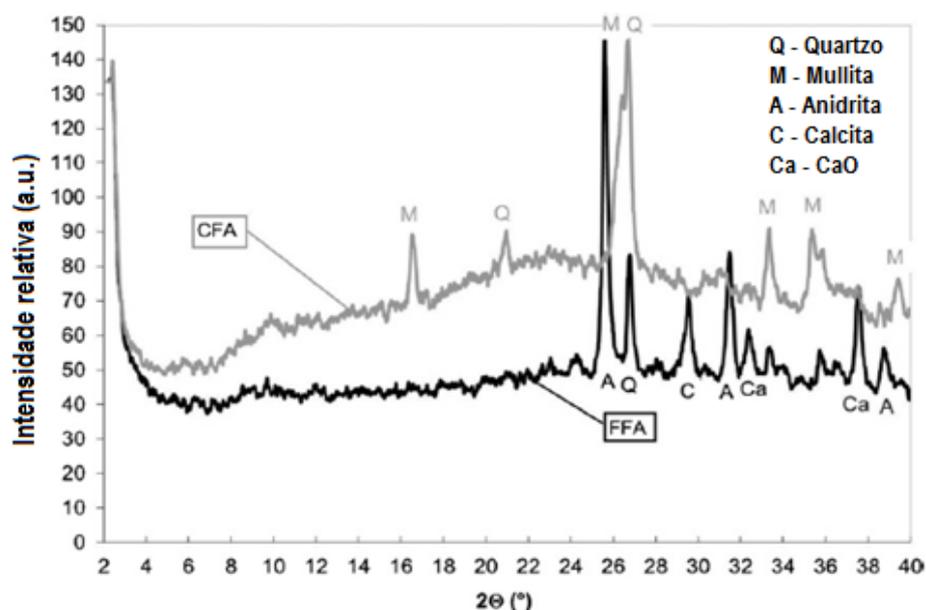


Figura 2.5 - Difratograma com a composição mineralógica CFA e FFA (adaptada).
Fonte: SOKOLAR e VODOVA, (2001).

2.7.3.1 Utilização de Cinzas Volantes em Concretos e Argamassas

O uso de cinza volante como adição mineral na produção de argamassas pode ocorrer em misturas binárias ou ternárias, combinadas com outras pozolanas, ou ainda misturas com cinzas de ambas as categorias. Considerando o concreto no estado fresco as cinzas volantes possuem um papel muito importante, uma vez que ela melhora a coesão e a trabalhabilidade, diminuindo a exsudação e a segregação e aumentando o tempo de pega. Já no estado endurecido, a cinza volante contribui para a diminuição da temperatura devido às reações de hidratação que se apresentam inicialmente de forma mais lenta (AZEVEDO, 2002).

As cinzas volantes influenciam na grande maioria das propriedades do concreto endurecido, nomeadamente na resistência mecânica e a durabilidade. É possível enumerar dois dos efeitos fundamentais associados à incorporação em argamassas: o efeito físico (efeito *filler*) e o efeito químico (efeito pozolânico).

O efeito *filler* é caracterizado pelo preenchimento com partículas de cinzas volantes nos vazios existentes entre as partículas de cimento, de dimensão superior, como mostra a Figura 2.6. Assim, é garantida uma maior compactidade e densidade da pasta, mesmo antes do desenvolvimento das ligações químicas quando da hidratação do cimento.

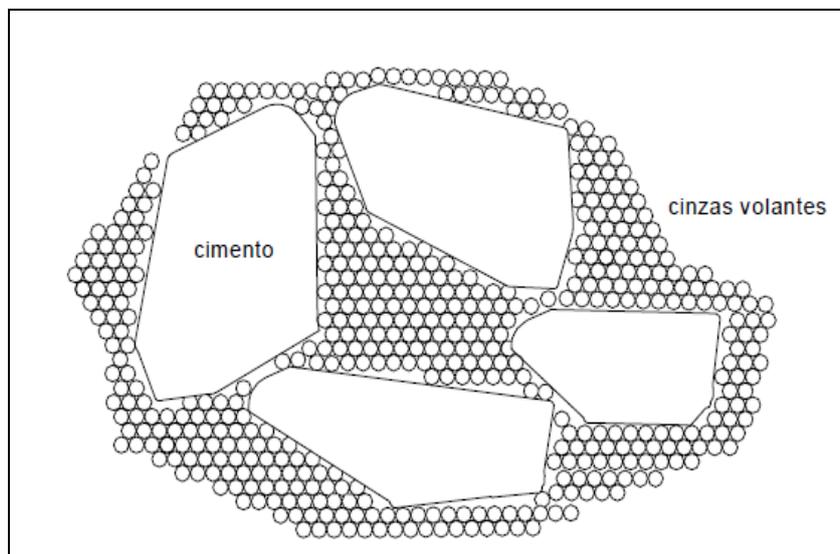


Figura 2.6 - Efeito Filer das cinzas volantes. Fonte: AZEVEDO, (2002).

O efeito pozolânico é devido à presença de compostos siliciosos ou sílico-aluminosos que por si só apresentam pouco ou nenhum valor aglomerante, mas que, na presença de água, ficam aptos a se relacionarem quimicamente com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, formando compostos com propriedades aglomerantes (AZEVEDO, 2002).

Os eventuais ganhos de resistência e durabilidade serão manifestamente consequência da maior ou menor efetivação destes dois efeitos. De um modo geral, as cinzas volantes contribuem para a diminuição das características mecânicas dos corpos de provas nas primeiras idades. No entanto, quando são atingidas idades mais avançadas, os corpos de prova com cinzas volantes podem apresentar resistências mecânicas semelhantes ou até mesmo superiores às determinadas em corpos de controle, sem adição de cinzas. Devido ao fato de a reação pozolânica ser lenta, mas prolongada, verifica-se uma recuperação dos níveis de resistência nos corpos com cinzas ao longo do tempo de cura, caso estes sejam curados devidamente, uma vez que, a reação pozolânica só ocorre na presença de água (ACI COMMITTEE 232, 1996).

Nos trabalhos de CHENGALA e Chen (2011), foi incorporada em uma matriz de argamassa cinza volante proveniente de um gaseificador industrial em que as amostras após os estados de cura, foram submetidas a análise de DRX e analisadas por microscopia de varredura. A Tabela 2.2 mostrou que a composição das argamassas aditivadas com este tipo de cinza vazia com que a mesma apresentasse baixa moderada e fluidez.

Tabela 2.2 - Com a composição da argamassa com cinza proveniente do gaseificador
Fonte: CHENGALA e CHEN, (2011).

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Proporção	41,85	16,60	11,41	0,93	18,52	1,92	0,70	1,53

Numa segunda mistura os autores adicionaram outros ingredientes a argamassa, mostrados na Tabela 2.3, a fim de que se garantisse as propriedades de modelagem e fluidez. À mistura foi adicionada água para se fazer uma argamassa nas proporções de 1:5:1

Tabela 2.3 - Tabela de composição química com outros ingredientes cerâmicos encontrados nas cinzas volantes. Fonte: CHENGALA e CHEN, (2011).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Argila	51,4	33,6	0,79	0,34	0,07	0,19	1,01	0,16
Quartzo	82	12,5	0,24	0,1	0,06	0,15	0,85	0,28
Feldspato	76,7	13,3	0,15	0,01	0,21	0,07	4,83	3,83

O difratograma da cinza da Figura 2.7 mostra as seguintes fases cristalinas: quartzo, tridimita, gehlenite, magnetita, magnesioferrita, mulita, clinostatite. A Figura 2.8 apresenta as curvas de análise térmica TG e DSC, com o primeiro pico exotérmico à 599.3°C, e a TGA cai abruptamente. Uma razão provável seria a evaporação de água e a transformação a gás.

Há um grande pico endotérmico a 757.1°C a 1191.4°C, e a curva decai lentamente.

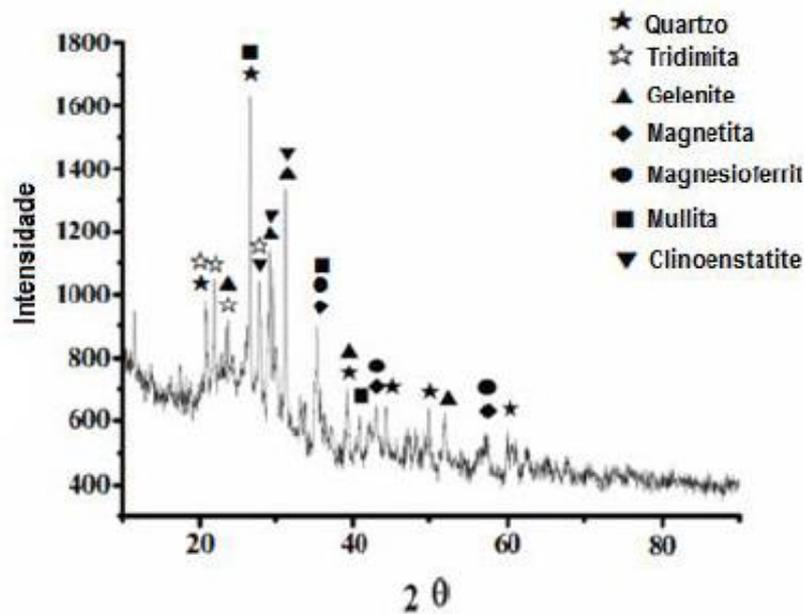


Figura 2.7 - Gráfico de Difração de raio - X da Cinza e suas fases cristalinas. Fonte: CHENGALA e CHEN, (2001).

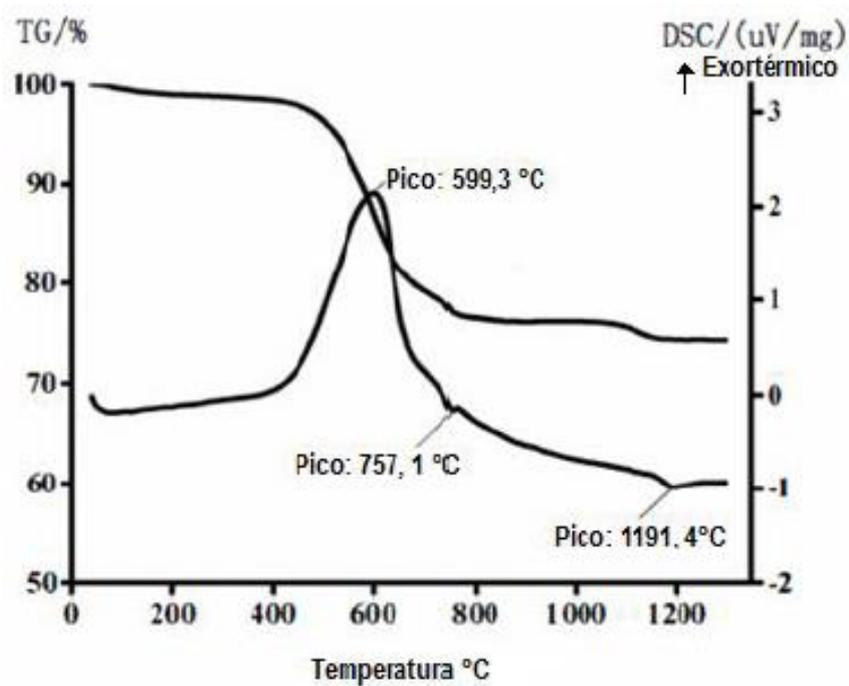


Figura 2.8 - Gráfico de análise Térmico (TG) e (DSC) das cinzas volantes. Fonte: CHENGALA e CHEN, (2001).

2.8 MATERIAIS CIMENTICIOS ADITIVADOS COM POLÍMERO

Na aplicação tecnológica de aditivos em argamassas e concretos a utilização de polímeros não é tão recente. De acordo com OHAMA (1998), as primeiras notícias de patentes utilizando esse material datam do início da década de 20. Logo desde esse

início muitos estudos estão sendo conduzidos até os dias atuais para a melhoria e desenvolvimento e aprimoramento de materiais cimentícios, modificados com polímeros, o que se faz abrir uma ampla concorrência entre vários fabricantes industriais de aditivos poliméricos para aplicação no vasto campo da indústria da construção civil.

Segundo os estudos de OHAMA (1997), materiais conhecidos como compósitos de cimento e polímero (*concret – polymer composites*), são materiais que tiveram a substituição parcial ou total do cimento como ligante e substituídos polímeros sintéticos em suas composições. Devido a essa substituição surgiram três tipos de grupos que caracterizam os tipos de concreto-polímero:

Grupo 01 – Concreto e argamassa modificada com polímeros (*polymer – modified concret – PMC e polymer – modified montar – PMM*);

Grupo 02 – Concreto e argamassa impregnada com polímero (*polymer – impregnated concret – PMC e polymer – impregnated montar – PMM*);

Grupo 03 – Concreto e argamassas poliméricos (*polymer – concret – PC e polymer – montar – PC*).

Tanto o cimento quanto o látex, são dois tipos de ligantes que quando unidos interagem mutuamente entre si dando origem a uma co-matriz, estabelecendo um modelo promovido pela hidratação do cimento em que geralmente corre um processo de formação de filme do látex (OHAMA 1998).

2.8.1 Formação do Filme Polimérico

A formação de um filme de látex polimérico resulta de fenômenos físico-químicos diversos. Dentre esses, podem-se se destacar a coalescência das partículas de latex individuais, como mostra a Figura 2.9. Em resumo, resulta da deformação, compactação, coesão e interdifusão das cadeias poliméricas. As partículas mantêm certa distância tornando-se afastadas por forças estabilizadoras (eletrostática e/ou estéricas) resultantes de grupos surfactantes e grupos terminais adsorvidos. Quando duas partículas tem forças suficientes para superar essas forças de repulsão, ocorre a formação do filme, o que ocorre quando se estabelece a elevação da temperatura, o bastante para ocorrer o movimento Browniano das partículas de polímero, ou de forças adicionais que estão realizando trabalho na fase líquida que envolve as esferas poliméricas (gotas), esse fenômeno é facilitado pela evaporação, no caso dos *polymer –*

modified montar PMM, a retirada de água para que ocorra a hidratação do cimento (STEWART *et al.* 2000; BEELDENS *et al.* 2003).

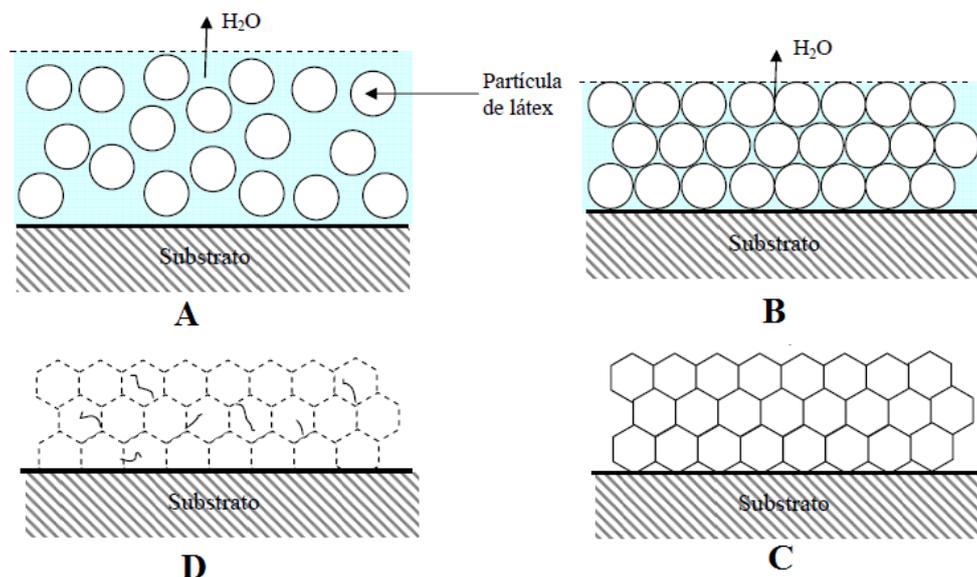


Figura 2.9 - Etapa teórica de formação do filme polimérico em dispersão aquosa tipo látex acrílico. Fonte: BUCKMANN, (2011) adaptado: (A) Partícula de látex dispersas em água aplicadas sobre um substrato, (B) Após o estágio de evaporação da água na mistura ocorre a aproximação das partículas e o início do empacotamento, (C) Consolidação do empacotamento caracterizado pela deformação das partículas, (D) Difusão das cadeias poliméricas ocorrendo a mistura e desaparecimento das bordas.

2.8.2 Interfase de Interação Entre Aditivo Polimérico e o Cimento Portland

A interação entre o polímero e cimento é discutida, e é sabido que esse tipo de interação ocorre de maneira física e/ou química (CHANDRA e FLODIN, 1987; SU *et al.*, 1993; SAKAI e SUGITA, 1995; SILVA e ROMAN, 2001).

Um dos principais fatores a ser observado em relação aplicação do polímero ou de seu surfactante no cimento e o processo de dispersão/floculação. A inserção do polímero na matriz cimentícia pode alterar o estado de floculação do cimento bem como de outras suspensões. Geralmente quatro principais casos são observados quando se introduz polímero em misturas cimentícias.

1º caso – A ocorrência de dispersão do sistema cimentício, devido a ocorrência da estabilização eletrostática dos polímeros (ou surfactantes) aniônicos

Na superfície do cimento são adsorvidos polímeros aniônicos tornando sua superfície com carga negativa gerando uma repulsão eletrostática, o que facilita a

movimentação dos grãos no fluido devido à individualização das partículas com a diminuição do atrito interno.

2º caso – Quando é inserido na mistura um polímero não iônico, em baixas concentrações ele não é capaz de cobrir toda a superfície das partículas em suspensão.

Neste caso surge um efeito chamado “ponte”, que é diferentes pontos da cadeia polimérica interligando diferentes partículas formando um mecanismo de floculação. (FARDIM, 2002; SO *et al*; 2001; RACHAS *et al*; 2000).

3º caso - quando ocorre um aumento da concentração do polímero, em grandes quantidades o suficiente para garantir o cobrimento de toda partícula sólida é possível que ocorra dispersão da solução através do impedimento estérico. O que ocorre neste caso, é que se duas partículas com camada de polímero adsorvidas se aproximam uma das outras, intensifica-se a concentração de polímero nesta região de interfase entre as partículas, ocorrendo um aumento da pressão osmótica na região de interfase. Neste caso a única variável para que isso ocorra é que a camada de polímero tenha espessura suficiente para que surja força de atração de Van der Waals do tipo fracas. Porém dentro de um limite em que as forças de repulsão sejam eficientes, visto que se observa um decaimento logarítmico destas forças de repulsão com a espessura do filme (SO *et al*; 2001; RACHAS *et al*; 2000; SJOBERG *et al*; 1999; MONDAIN-MONVAL *et al*; 1998; LAAT, 1995).

4º caso – Este tipo de interação explicado pela primeira vez em literatura científica por ASAKURA e OOSAWA (1954), afirma que a interação floculativa ocorre quando um polímero não absorvível ou fracamente absorvível é adicionado à mistura em que se observa duas aproximações de partículas em uma distância de separação menor que a estrutura de um espiral do polímero livre. A consequência imediata é a expulsão do polímero da zona entre partículas livre de polímeros. Esta adsorção negativa resulta em uma força atrativa entre os sólidos. Porém este efeito torna-se mais significativo quando a concentração do polímero está acima de um valor crítico que, por sua vez, é bastante dependente do tamanho da cadeia polimérica em termos físico-químicos a concentração crítica diminui com o aumento do tamanho da cadeia (UNIQUEMA, 2005 e FARDIM, 2002).

Em geral os cimentos Portland em suas composições contêm grandes quantidades de compostos alcalinos solúveis. Com isso o pH e a força iônica permanecem elevados praticamente durante todo tempo. Uma observação importante é que o valor do pH da pasta de cimento Portland tem um aumento de valor da ordem de

12,8 para 13,4 num tempo de 0 a 12h e se mantém constante durante todo esse tempo (ROTHSTEIN *et al*; 2002).

Segundo TAYLOR (2003), os cátions ácidos-base geralmente ocorrem nos cimentos na forma de sulfatos alcalinos ou nas fases principais que compõe o cimento.

Segundo o mesmo autor em ambos os casos tanto faz um curto ou um pequeno espaço de tempo, o ânion balanceador entra na formação de um produto de hidratação de baixa solubilidade a uma quantidade equivalente de íon hidroxila OH^- é liberada durando 24h. Os estudos realizados nas soluções dos poros mostram que a concentração de Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} e OH^- são rapidamente alcançados.

O processo de hidrólise pode ocorrer em polímeros utilizados nas modificações das argamassas, sendo que a hidrólise alcalina também denominada de saponificação é caracterizada por uma reação química em que uma molécula de Ester é quebrada para formar um álcool e um sal de ácido carboxílico.

Nos poros cimentícios os polímeros que contém grupos acetato de vinila (PVA com grau de hidrólise <100%, PVAc, EVA) sofrem processo de hidrólise. No meio ambiente essa hidrólise ocorre nos poros do material cimentício quando em contato com a água conforme mostra a Figura 2.10, para um polímero PVA com grau de hidrólise superior a 100%.

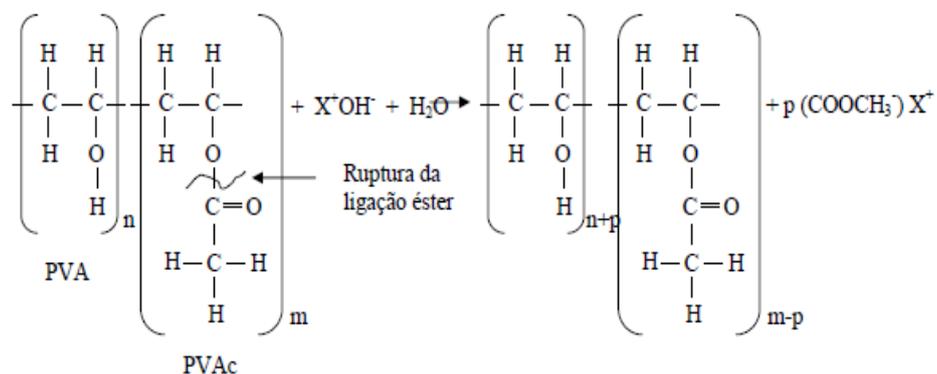


Figura 2.10 - Reação de hidrólise dos grupos orgânicos Acetato de vinila das sequências de PVA do poli (alcool vinílico) em meio alcalino. Fonte: MANSSUR, (2007).

A possibilidade da ocorrência de quebra do Ester para o poliálcool vinílico também existe com formação de íons carboxilatos. Observa-se que diferentes e diversos tipos de polímeros deste tipo já são fornecidos na forma aniônica, não sendo esperada, neste caso, a ocorrência da hidrólise, apenas o contato do cátion balanceador no contato

com a água. No processo de cura do material iniciando com a hidratação e evaporação da água de amassadura, são verificados que novos tipos de interação se desenvolvem.

Em polímeros que possuem a forma de látices, a formação do compósito ocorrerá através do desenvolvimento de interações físicas obtidas a partir do processo de hidratação do cimento e do fator de coalescimento das partículas de látex produzindo uma película de camada muito fina chamada de (filme polimérico), o que conduz a uma co-matriz cimento polímero monolítica.

Nos estudos de OHAMA (1998), foi proposto um modelo básico que foi refinado dando origem a um modelo integrado que tenta incorporar as influências recíprocas entre o polímero e o cimento (BEELDENS *et al*; 2003).

Esse modelo de hidratação proposto pode ser dividido em 4 etapas como mostra a Figura 2.11.

1º Etapa: Essa etapa inicial ocorre quando no processo de mistura, as partículas de cimento em conjunto com as partículas de polímero estão dispersas em água, o que resulta de uma solução alcalina nos poros.

2º Etapa: Uma parte do polímero inserido na mistura é depositado nos grãos de cimento e agregado miúdo. A razão Polímero/Cimento, determina o quanto de polímero está presente na solução do poro como também presente na parte superficial dos agregados. Nesta etapa parte do polímero pode coalescer formando assim um filme contínuo, de preferência os depositados na superfície dos grãos de cimento onde forças extras são exercidas nas partículas poliméricas devido a extração da água para a hidratação do cimento. O filme polimérico pode de forma parcial envelopar as partículas de grão de cimento o que resulta em uma paralisação retardando ou até mesmo parando o efeito de hidratação dos grãos de cimento.

3º Etapa: Esta etapa depende fortemente das condições de cura. Se não houver um período de cura seca, a totalidade de formação de filme é retardada e torna-se limitada a influência das propriedades na mistura. Se ocorre a cura seca, ocorre a formação do filme polimérico e conseqüentemente inicia-se as primeiras resistências nas primeiras idades. Na fase líquida do BULK precipitações de produtos hidratados estão presentes, o que forma uma combinação de produtos orgânicos e inorgânicos, neste caso as frações desses produtos dependem da relação (Polímero/Cimento). Nem sempre o desenvolvimento da resistência do material vai depender das frações poliméricas incluídas nessa relação.

4º Etapa: nesta etapa final, observa-se ainda a continuação da hidratação e a formação do filme, em que um filme contínuo vai sendo formado enquanto ocorre a saída da água dos capilares. Parte do polímero que ainda está presente na dispersão fica restringida na interfase entre os agregados e a fase inorgânica-orgânica precipitada, e nos poros capilares, que ocasionalmente esta é a parte que mais contribui para o desenvolvimento das propriedades elásticas e de resistências finais. No caso de uma maior relação (Polímero/cimento), a continuidade da fase polimérica através da matriz cimentícia é mais pronunciada.

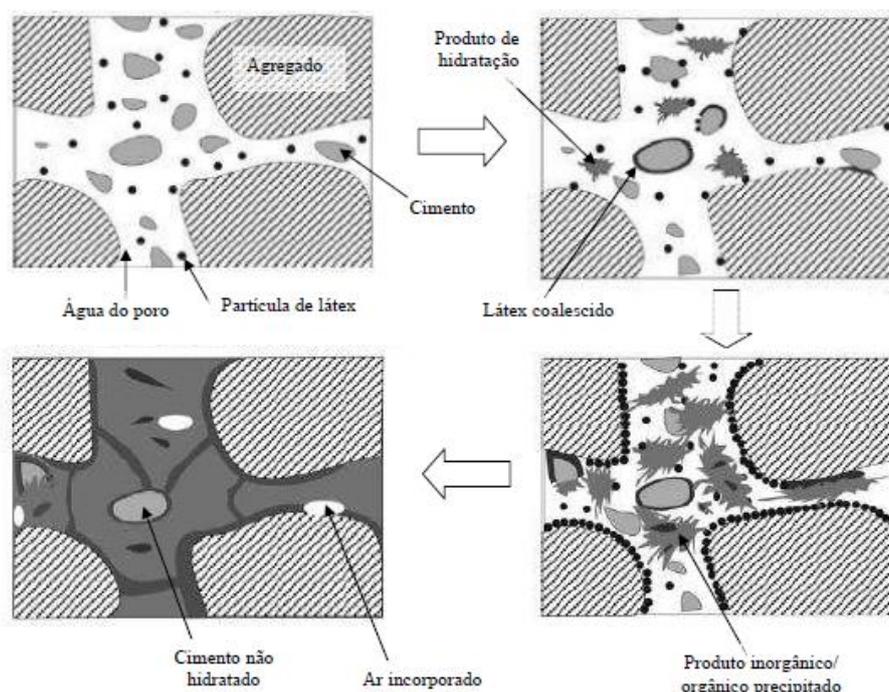


Figura 2.11 - Fases do modelo de hidratação do cimento em argamassa dosadas com latex. Fonte: MANSSUR, adaptadas de BEELDENS, *et al*; (2003).

Numa proposta de diferentes condições de cura este modelo pode ser o mais representativo. A partir desta proposta, pode-se considerar que as condições mais favoráveis para se ter uma elevada resistência e a adoção de um processo de cura em meio úmido, seguida de uma cura em meio seco, quanto maior for o período em que a cura se processa em meio úmido maior será o valor da resistência à flexão (impedimento da retração), seguido de um período de cura em baixas umidades relativas, esta medidas significam que o processo de hidratação do cimento ocorre com limitada formação de filme polimérico, e esse restante de partículas poliméricas permanecem na solução do poro com isso uma maior quantidade de partícula polimérica

serão inseridas no filme contínuo que terá sua formação consolidada no estágio final. Porém, se ocorrer um período de cura seca mais cedo, dentro do processo, essa formação do filme ocorrerá mais cedo, paralelamente com o processo de hidratação do cimento, resultando num grande envelopamento dos produtos de hidratação, bem como a junção dos produtos da fase polimérica dos produtos precipitados a partir da solução que está no poro (BEELDENS *et al.*; 2003).

Nos trabalhos de SAKAI e SUGITA (1995), um outro tipo de modelo é sugerido na formação de compósitos cimentícios com ênfase na microestrutura da pasta e nos ensaios mecânicos na qual os autores aproveitam para comparar os efeitos da adição do polímero na forma de pó redispersível e na forma de emulsão. Logo após a mistura das partículas poliméricas envolverem as partículas de cimento de forma independente da adição de polímero. Aos 3 dias da aplicação as partículas que haviam sido depositadas na superfície do cimento pareciam intocadas com o efeito de hidratação do cimento, sendo que foi observado partículas dispersas nos produtos de hidratação formados. Observando as argamassas modificadas com polímeros na forma de emulsão, verificou-se a presença de partículas de polímero circundada por produtos de hidratação próximos a superfície dos agregados. Entre as partículas de cimento foi observada uma mistura de produtos de hidratação em conjunto com partículas poliméricas. No caso dos compósitos formados com polímero na forma de pó, não se observou a camada de polímero circundando os produtos de hidratação, a conclusão feita pelos autores é que essa metodologia reduz as resistências à tração e flexão obtidas com essas adições.

O mesmo resultado foi obtido por AFRIDI *et al.*; 1994), concluindo que os modificadores de cimento em forma de pó redispersante não forma um filme de boa qualidade apresentando menor efeito de adesão agregado-matriz ou menor aumento global da ligação cimento- hidratos-agregado.

Comparando esse modelo com os outros propostos encontra-se a principal diferença na formação do filme polimérico apenas na interface e na superfície de evaporação das argamassas, sendo o esforço produzido na argamassa pelas partículas poliméricas ser na forma de particulado, uma vez que as partículas permanecem intocadas durante o processo de hidratação (SAKAI e SUGITA, 1995; SILVA e ROMAN, 2001).

A Figura 2.12, mostra a consolidação final da microestrutura do material formado. Foram observados por alguns autores a ocorrência de interações químicas entre o cimento e/ou seus íons dissolvidos e as partículas poliméricas, especialmente

pela formação de compostos complexos (LARBI e BIJEN, 1990; ATKINS *et al.*, 1991; HILL e SYTTLES, 1992; OHAMA, 1998; RHA *et al.*, 1999; BONAPASTA, 2001; BONAPASTA, 2002).

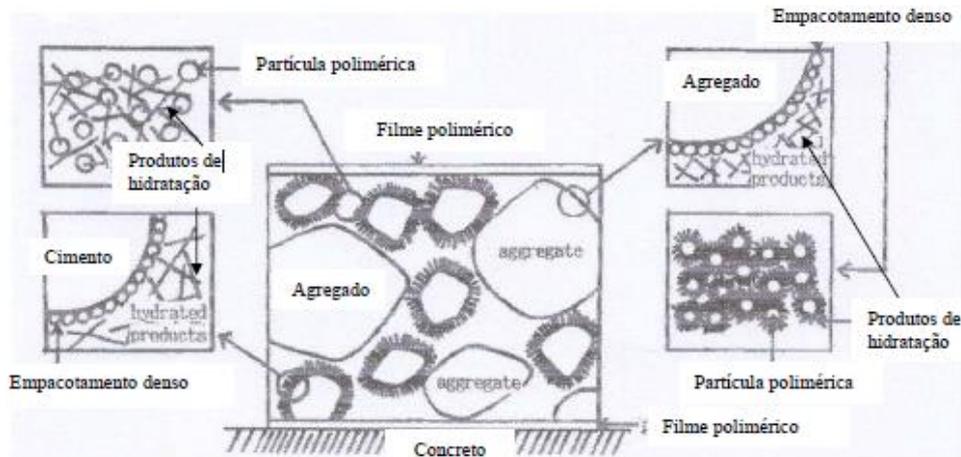


Figura 2.12 - Modelo de formação de compósito de PMM. Fonte: SAKAI e SUGITA, (1995).

Na Figura 2.13, é mostrado o mecanismo em que as superfícies poliméricas interagem entre si ou com as superfícies sólidas dos agregados ou dos compostos do cimento hidratado, através dos íons presentes nas soluções dos poros.

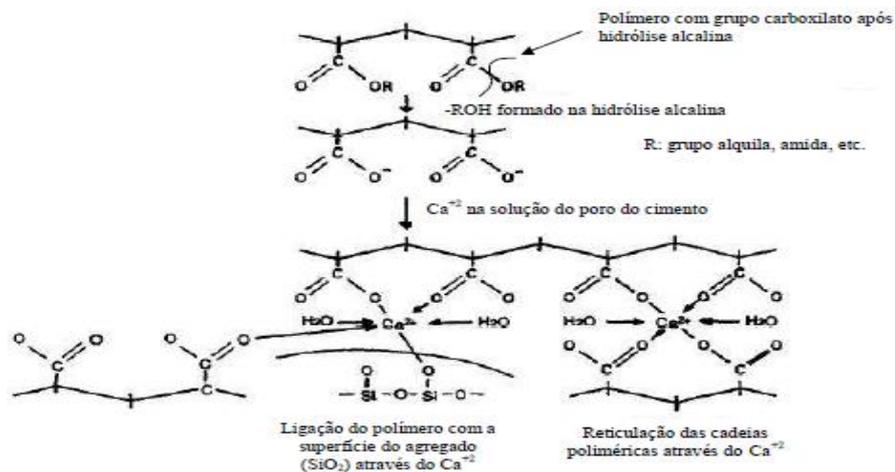


Figura 2.13 - Modelo esquemático do mecanismo de interação entre Polímeros com grupo carboxilatos, íon Ca^{+2} liberados na hidratação do cimento e a superfície agregado. Fonte: OHAMA, (1998).

2. 9 REOLOGIA

2.9.1 Reologia Conceitos Gerais

O termo reologia se origina da palavra *rhein* que significa “escorrer” e logya que significa “ciência”. Ou seja, reologia é definida como a ciência que estuda o modo pelo qual a matéria se deforma ou escoar, quando submetida a forças externas (MACHADO, 2002). A reologia analisa a resposta de um material provocada pela aplicação de uma tensão ou de uma deformação. É o ramo da física que estuda a mecânica dos corpos deformáveis os quais podem se encontrar no estado sólido, líquido e gasoso (TATTERSAL e BANFILL, 1983).

Definida por Newton e Hooke no século XVII, foi somente em 1920, quando a criação e descoberta de materiais como borrachas sintéticas, plásticos, cerâmica, tinta e fluidos biológicos é que a reologia passou a ter importância industrial, quando surgiu a necessidade de ser estudada mais profundamente por áreas como a Física, Matemática e Química dos coloides (TANNER, 1988).

Como ciência, a reologia tem importância para o entendimento da relação estrutura/propriedade dos materiais, tendo em vista que a variação das propriedades reológicas está intimamente relacionada às mudanças na estrutura, caso sejam mantidas as condições de teste. Já na indústria, o conhecimento do comportamento reológico de matérias-primas e produtos é importante para o projeto de equipamentos e controle dos processos (NASCIMENTO, 2008).

Na prática a reologia está mais interessada em fluidos que apresentam um comportamento complexo, cujas propriedades de escoamento são mais complicadas em termos industriais, do que as de fluidos que apresentam um comportamento simples (líquidos ou gases), muito embora possam existir materiais que apresentem um comportamento simples sobre condições restritas de ensaios, os mesmos poderiam apresentar um comportamento totalmente diferente e complexo quando submetidos a outras condições (TATTERSAL e BANFILL, 1983).

Segundo VAN WAZER *et al*; (1966), em materiais que apresentam um comportamento multifásico é difícil relacionar as curvas de escoamento, pois elas sempre são usadas para medidas envolvendo escoamento laminar, condições em que a velocidade de escoamento varia só na direção da altura da lamina líquida considerada e não nas duas direções perpendiculares a altura, sempre considerando um meio contínuo,

o que se torna complicado para sistemas particulados no qual são compostos por partículas grandes na fase dispersa. No caso a solução encontrada em relação a descontinuidade foi o uso de instrumentos de maiores dimensões, para caracterizar seus escoamentos.

A reologia de suspensões compreende o estudo do comportamento de fluxo de suspensões de sólidos utilizando, principalmente, a determinação da viscosidade aparente e a tensão de escoamento. O principal objetivo da reologia segundo Barnes *et al.*; (1989), e o estudo da deformação e fluxo da matéria, que envolvem fenômenos como elasticidade, plasticidade e viscosidade.

2.9.2 Reologia de Pastas Cimentícias

De uma forma geral o comportamento reológico das argamassas é considerado bastante complexo, principalmente a forma como esse material é transportado para o canteiro de obra, bem como o modo de como ele é aplicado, que pode envolver alta tecnologia ou até mesmo métodos convencionais de transporte e aplicação (BARBOSA, 2010).

Pastas de cimentos podem ser caracterizadas como suspensões coloidais em que as interações entre as partículas que as constituem podem provocar o aparecimento de várias microestruturas (JARNY, ROUSSELB, RODTSA, BERTRANDA, LE ROYB; COUSSOTA, 2005). De acordo com a tensão de cisalhamento aplicada em conjunto com a taxa de deformação essas microestruturas podem apresentar diferentes comportamentos macroscópicos (COUSSOT, 1999).

De acordo com CHAPPUIS e TATTERSALL (1991), os estudos reológicos das pastas cimentícias possuem grande importância, pois na prática, a viscosidade plástica pode ter um papel importante, na determinação das várias características do material, essas características podem ser verificadas no período de indução da hidratação do cimento, no processo de bombeamento do produto até determinadas distâncias e também, na verificação da facilidade de aplicação e acabamento da superfície do substrato (Trabalhabilidade). Quando estudadas no estado fresco, o seu comportamento, tem sido caracterizado através do conceito chamado de trabalhabilidade, uma vez que as características reológicas desse tipo de fluido é de não-newtoniano, o mesmo requer uma metodologia sistemática para a formulação de argamassas baseada em conceitos

micro estruturais/reológico, isto é, que a definição de trabalhabilidade, seja transformada em grandeza reológica mensurável (PILEGGI *et al.*, 2006).

Para RAGO, (1999), concretos e argamassas podem ser considerados como sistema disperso composto por agregados, sendo que para concreto é usado o agregado graúdo e para argamassas o agregado miúdo, que estão inserido em uma matriz de partículas finas, chamada de pasta de aglomerante cimento + água, as suas características reológicas estão intimamente ligadas ao agregado (dimensão, forma e distribuição granulométrica), a pasta (características químicas, físicas e quantidades dos materiais constituintes e teor de água) e a interação pasta agregado.

O estudo reológico das argamassas está relacionado com a melhoria e facilidade de seu espalhamento e penetração nos poros dos substratos em que elas são aplicadas. As argamassas devem apresentar características ótimas de viscosidade como tensão de escoamento ideal, para que a mesmas venham suportar o peso da placa cerâmica (lajota), além do seu próprio peso sem que ocorra escorregamento após a sua aplicação.

Para OTSUBO (1980), o comportamento reológico das pastas cimentícias, é modificado de forma contínua de acordo com o tempo, em que os modelos reológicos mais comuns são o modelo de *Bingham* e *Herschel- Bulckley*, seguidos por Casson e Ellis.

Segundo ROUSSEL e LE ROY (2005), considerando-se as pastas de cimento no estado fresco, diversos modelos empíricos e teóricos tem sido proposto para descrever o comportamento reológico desse material. Entretanto, vários autores reforçam e simplificam que apenas os modelos de *Bingham* e *Herschel-Bulkley*, são os mais representativos modelos de escoamento desse material, pois os mesmos levam em consideração o comportamento pseudoplástico dessas suspensões concentradas. Se no caso a suspensão apresentar uma tensão limite de escoamento pequeno, o modelo *Bingham*, será o suficiente para descrever o comportamento da pasta no estado fresco, dependendo do teor de água que compõe a suspensão, o comportamento do material pode ser do tipo viscoplástico, com pseudoplasticidade ou dilatação.

De acordo com TATTERSALL (1991), apesar de já terem sido feitos diversos testes em argamassas e concretos utilizando vários modelos reológicos, a literatura é bem clara quanto ao modelo que melhor descreve o comportamento das pastas cerâmicas ao longo de sua fase no estado fresco. O modelo que melhor representa é o modelo de *Bingham*, que é representado pela Figura 2.14.

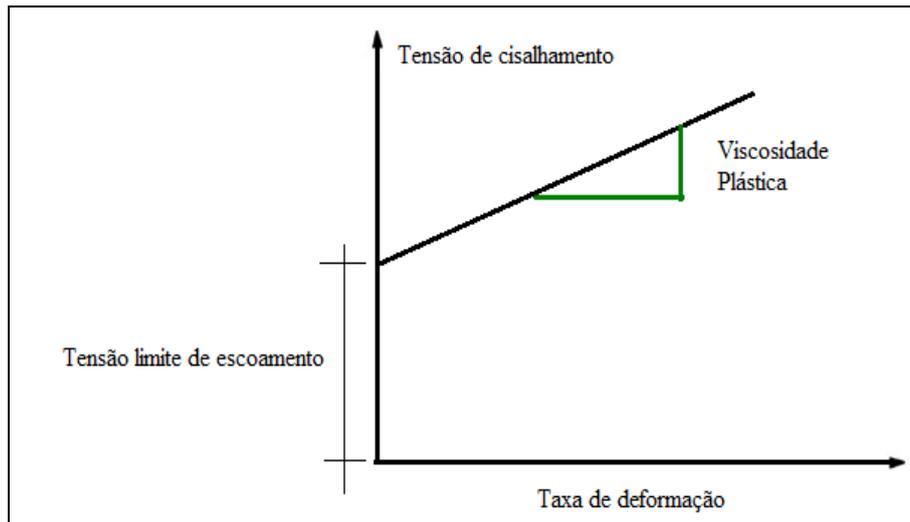


Figura 2.14 - Curva de escoamento para um fluido de Bingham.
Fonte: FERRARIS, (1996).

A tensão limite de escoamento é a tensão necessária para que um material no estado fluido inicie o seu escoamento. Ou seja, é a tensão mínima para que se inicie o movimento. Para um fluido que tenha características do modelo de Bingham, a viscosidade plástica é definida por uma diferença entre a tensão limite de escoamento e a tensão de escoamento, dividida pela taxa de cisalhamento.

A explicação para o comportamento de um fluido binghamiano é que o fluido, em repouso, contém uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir qualquer tensão inferior à tensão de escoamento. Caso a tensão de escoamento seja excedida, a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como um fluido newtoniano sob uma determinada tensão de cisalhamento. Quando a tensão de cisalhamento que age sobre o sistema for reduzida e atingir valores inferiores à tensão de escoamento, a estrutura tridimensional é recuperada (TANNER, 1988).

Matematicamente a maioria das equações usadas para explicar os modelos reológicos de sistemas particulados sólido/fluido, tenta fazer uma relação da concentração das partículas que estão em suspensão com a viscosidade, e a tensão de cisalhamento ou taxa de cisalhamento, assumindo que a viscosidade apresenta apenas um valor para o sistema que está sendo estudado (argamassa). A reologia das pastas cimentícias (concretos e argamassas) é bastante complexo devidos diversos fatores como a composição e as mudanças estruturais é devido às reações químicas que ocorrem.

Diversos pesquisadores descreveram esses sistemas como fluidos não newtonianos complexos que possuem uma tensão limite de escoamento e uma viscosidade que depende da taxa de cisalhamento, sendo que ambos variam com o tempo à medida que endurece, à tensão limite de escoamento e à viscosidade plástica aumentam.

Para PILEGGI (2006), as argamassas apresentam um comportamento de fluido não newtoniano (pseudoplástico), e exibem uma viscosidade que varia com a tensão aplicada. E só há deformação significativa a partir de uma tensão crítica. As pastas de cimento (água+cimento) apresentam propriedades reológicas bastante ajustáveis ao modelo reológico de *Hershel-Bulkley*, desde que sejam respeitados certos limites de proporção água/cimento.

Segundo HU e LARRARD (1995), as argamassas no estado fluido são suspensões reativas, cuja consistência é modificada ao longo do tempo, sobretudo pela atuação do cimento.

A Tabela 2.4 apresenta os modelos reológicos aplicados às pastas cerâmicas e argamassas argamassa (MACHADO, 2002).

Tabela 2.4 - Equações que relacionam a tensão e a taxa de cisalhamento para os diferentes modelos reológicos aplicados em pastas cerâmicas e argamassas.

Modelo	Equação	Parâmetros
Ostwald-de-Waale	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$	Índice de consistência (K) Índice de comportamento (n)
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Viscosidade plástica (μ_p)
Herschell-Bulckley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Índice de consistência (K) Índice de comportamento (n)
Casson	$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + (\mu_\infty \cdot \dot{\gamma})^{0,5}$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento (μ_∞)

Fonte: MACHADO, (2002).

2.9.3 Influência de Parâmetros das Argamassas nas suas Propriedades Reológicas

2.9.3.1 Morfologia das Partículas

A forma e a distribuição granulométrica das partículas desenvolvem uma forte influência na reologia de materiais cimentícios no estado fresco. Essa relação é estabelecida devido à ocorrência direta entre a fluidez e à granulometria do material (REIS, 2008).

Segundo BONEN e SARKAR (1995), a fluidez inicial de sistemas particulados tipo sólido/fluido, com concentrações de elevadas de sólidos depende de características físicas que são íntimas do sistema que as constituem, tais como: distribuição granulométrica, fator de forma e textura superficial da partícula.

Devido os agregados inertes constituírem cerca de 70 a 80% do volume das argamassas, torna-se fácil compreender que suas características e qualidades seja importante nas suas propriedades intrínsecas, de modo que qualquer variação na sua qualidade implica um considerável efeito resultante na argamassa (HEWLETT, 2001).

O empacotamento é definido como a máxima capacidade de uma mistura, cuja separação é difícil devido estarem em diferentes classes granulométricas. Um exemplo disso é a mistura de grãos de cimento e grãos sílica ativa (FORMAGINI, 2005).

O empacotamento das partículas pode ser alterado por diversos tipos de fatores, entre esses fatores destacam-se: a existência de diversas distribuições granulométricas que podem, de forma geral, alterar a condição de dispersão inicial das partículas, a porosidade das partículas e o tamanho das mesmas, entre outros.

No que se refere ao fator de porosidade interna, as partículas podem apresentar duas características distintas. Podem ser totalmente densas, apresentando porosidade interna fechada, ou porosidade aberta. Para o efeito de distribuição granulométrica, as partículas que apresentam porosidade interna fechada são semelhantes às densas, resultam em misturas com densidade menor. As partículas que apresentam porosidade aberta influenciam de forma negativa no empacotamento devido às mesmas apresentar o formato irregular e também resultam em misturas com menores densidades, empacotamento com menor porosidade pode ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos com partículas menores que os mesmos (PANDOLFELLI, 2000).

Devido os vários tipos de interações que ocorrem entre as partículas de cimento, agregado e água este sistema possui grande tendência a flocular, por diversos tipos de interações que ocorre entre eles. Dentre as podem destacar são forças de Van der Waal entre as partículas e forças de origem eletrostática que ocorrem entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação, envolvendo as moléculas de água ou hidratos (AİTCIN *et al.*, 1994).

Geralmente as forças responsáveis pelas interações entre as partículas que constituem as massas cimentícias são bastante fracas e por consequência, se quebram facilmente por cisalhamento como mostra a Figura 2.15. Assim a tensão de cisalhamento aplicada ao sistema promove a quebra do conjunto floculado de maneira que o sistema inicie o escoamento. Normalmente essa quebra não é completa e a medida que se aumenta a taxa de cisalhamento, essa estrutura remanescente que ainda esta floculada é quebrada de maneira progressiva, levando a um comportamento pseudoplástico geralmente acompanhado de tixotropia (STRUBLE *et al.*; 1998).

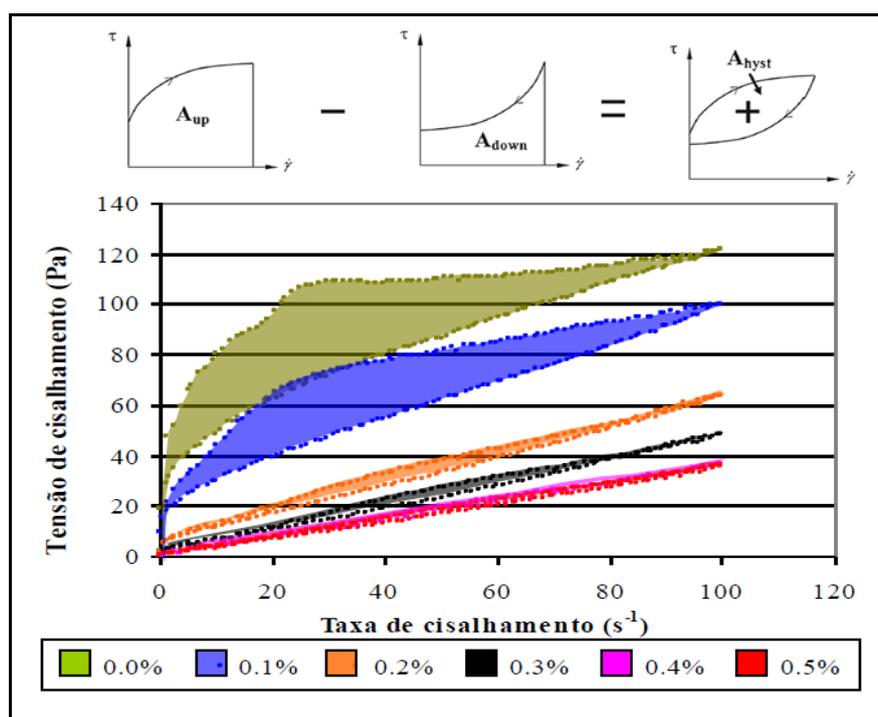


Figura 2.15 - Avaliação do comportamento reológico (tixotropia) de pastas cimentícias dosadas com diferentes aditivos Fonte: BURAK, (2014) e SENFF, HOTZA, REPETTE (2010) (adaptado).

A eliminação dos flocos de partículas formados pode resultar em uma série de desvantagens com relação à reologia das suspensões. PANDOLFELLI *et al.*, (2000), citam que, foi verificado que a redução da distância de separação entre as partículas

finas, provocadas pelo aprisionamento de água no interior dos aglomerados, eleva o número de colisões entre elas e, com isso, a viscosidade da suspensão.

De acordo com PANDOLFELLI (2000), existem três mecanismos básicos de interações entre as partículas são eles:

- Eletrostático: ocorre entre as partículas apresentam diferentes potenciais de cargas de sinais opostos que ocasionam a atração eletrostática e adesão entre as mesmas;
- Estérico: ocorre quando é adicionado um aditivo químico nas formulações, a adsorção superficial de um polímero de cadeia longa à superfície faz com que ocorra uma dificuldade mecânica de aproximação entre as partículas das argamassas;
- Eletroestérico: ocorre adsorção específica de moléculas com grupos ionizáveis ou polieletrólitos nas superfícies das partículas, no qual os íons provenientes da dissociação desses grupos ionizáveis somam uma barreira eletrostática ao efeito estérico.

2.9.3.2 Influência da Adição de Agregados nas Pastas

Em se tratando de materiais cimentícios argamassas e concretos os seus comportamentos reológicos são extremamente dependentes de seus constituintes (agregados graúdos e miúdos as proporções que constituem suas misturas. Segundo Castro, (2007) um estudo da natureza das mudanças que ocorrem na mistura pode fornecer informações que indicam o fator responsável por elas. Um desses fatores é a tensão de escoamento que está relacionada com a capacidade de escoamento do material, no caso de uma tensão de escoamento baixa o material cimentício no estado fluido escoar sob seu próprio peso. O autor ainda afirma que a viscosidade está relacionada com a segregação dos materiais. No entanto, esse material precisa ter suas propriedades de acordo com as necessidades de uso no campo. E são os materiais constituintes que vão proporcionar estas propriedades aos concretos e argamassas.

AİTCIN (2000), trabalhando as características do escoamento de concretos, afirma que suas propriedades reológicas são governadas por fatores físicos e químicos. E dentre os fatores físicos, estão a granulometria e a forma dos agregados. É sabido que o formato dos agregados influencia na trabalhabilidade do concreto e que a

granulometria influencia na porosidade e no esqueleto granular do material no estado endurecido, como mostra a Figura 2.16 abaixo.

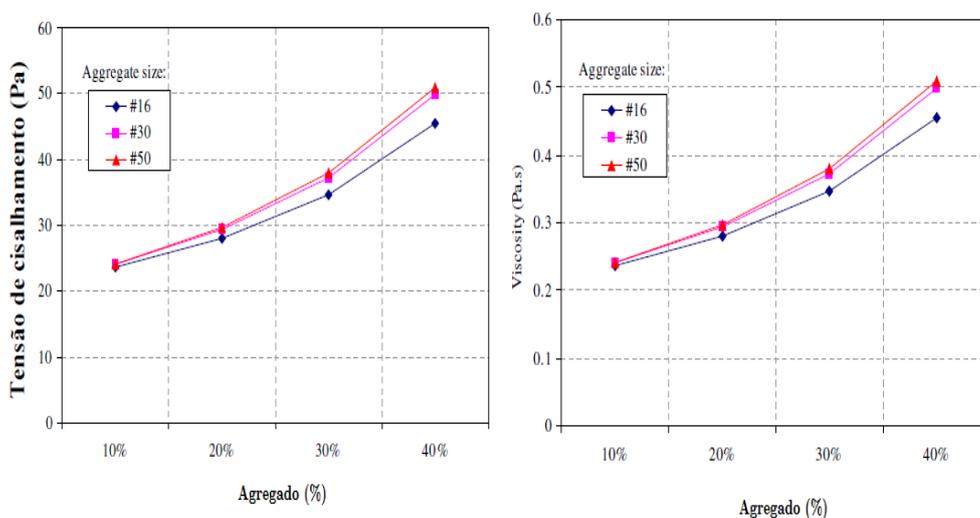


Figura 2.16 - Efeito da inserção de agregado em diferentes granulometrias nos parâmetros reológicos de argamassa. Fonte: GANG, KEJIN, THOMAS (2008).

De acordo com os estudos de STRUBLE (1998), onde foi adicionado agregado à pasta de cimento, foi observado um aumento tanto na viscosidade plástica quanto na tensão de escoamento desta mistura. Porém, esse mesmo estudo mostra que ambos os parâmetros são reduzidos quando a granulometria do agregado se torna mais densa. As adições químicas têm efeito muito grande sobre as propriedades do concreto.

TATTERSALL e BANFILL (1983) dividiram em dois grupos: plastificantes super plastificantes, que possuem um efeito predominante sobre a tensão de escoamento do material e os agentes incorporadores de ar, cuja influência principal se dá sobre a viscosidade plástica do concreto.

Os resultados mostraram que a adições do primeiro grupo interagem com as partículas de cimento, introduzindo uma camada de adsorção que evita a aproximação entre elas por meio de uma combinação de repulsões eletrostática e estérica, enfraquecendo a estrutura que pode se formar quando a mistura permanece em repouso e, conseqüentemente, reduzindo a tensão de escoamento do material. Como as partículas estão dispersas, existe uma pequena mudança da viscosidade plástica, porém isso depende da distribuição granulométrica global da mistura. As adições do segundo grupo introduzem bolhas de ar esféricas na mistura de concreto que agem como esferas rolantes para permitir que as partículas maiores escoem mais facilmente sobre as demais partículas. Assim, essas bolhas de ar têm uma maior influência sobre a viscosidade

plástica do que sobre a resistência da estrutura formada quando o material é deixado em repouso (CASTRO, 2007).

A sílica ativa que um resíduo oriundo das indústrias de ferro-ligas e silício metálico, cuja suas propriedades químicas (teor de $\text{SiO}_2 > 85\%$) e físicas (superfície específica média de $20 \text{ m}^2/\text{g}$), é usada na otimização dos materiais cimentícios, pelo fato de ela ser muito fina com os grãos esféricos. Alguns trabalhos comparam os efeitos das adições desse mineral, com pasta de cimento padrão com e sem adição da sílica (e BANFILL, 1981 e PARK, 2005).

As principais vantagens do uso da sílica ativa é que quando as minúsculas partículas esféricas estão bem dispersas no sistema cimento-água, elas podem deslocar moléculas de água da vizinhança dos grãos de cimento. Dessa forma, moléculas de água presas entre partículas de cimento floculadas podem ser liberadas e assim contribuir para fluidificar a mistura. Isto provoca um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade plástica do concreto (BACHE, 1981).

Porém, a substituição de parte do cimento por uma adição mineral também pode resultar em uma redução de ambos os parâmetros reológicos do concreto. A granulometria melhorada do aglomerante e o efeito lubrificante concedido pelas pequenas partículas de sílica possivelmente reduzem o atrito entre os agregados e, conseqüentemente, a tensão de escoamento e a viscosidade plástica do material (NEHDI, MINDESS e AÏTCIN (1998); ZHANG e HAN 2000).

A incorporação de sílica ativa em substituição ao cimento até um determinado valor limite, que depende do teor de cimento e que diminui com a redução do teor de água, reduz a viscosidade plástica em até 50%; a tensão de escoamento é praticamente constante até que o valor limite para substituição de cimento por sílica ativa seja alcançado e, a partir daí, ela aumenta consideravelmente (WALLEVIK, 1990).

2.10 APLICAÇÕES DA REOLOGIA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS (CONCRETOS E ARGAMASSAS)

2.10.1 Argamassas e Concretos Bombeáveis

Uma das principais aplicações da reologia nas tecnologias de argamassas e concretos é no processo de bombeamento na qual a argamassa e o concreto são

transportados através de tubulação, do local de mistura até o ponto de aplicação, esse processo ocorre em altas taxas de cisalhamento (PILEGGI, 2002).

Nesse tipo de aplicação assume-se os materiais cimentícios (concretos e argamassas) no estado fluidos, pois são os mais indicados para esse tipo de aplicação. No entanto, essa afirmação não é verdadeira, devido a estudos sistemáticos do comportamento reológico de materiais cimentícios não ser comum em literatura. E além disso, as técnicas de caracterização reológica convencionais são capazes de simular o material na condição de bombeamento, quando o mesmo está submetido a elevadas taxa de cisalhamento em conjunto com uma acentuada restrição volumétrica (PANDOLFELLI, 2002)

No processo de bombeamento três etapas são abordadas de forma distintas que são:

- a) Mistura
- b) Transporte
- c) Moldagem

a) Mistura: nessa primeira etapa ocorre a mistura do material cimentício em que todo o material em forma de pó e agregado é misturado à água. É onde se determina o grau de homogeneidade, o estado de dispersão, a história do cisalhamento, o que leva a um aquecimento inicial do material. Observa-se que quanto maior a energia (agitação) fornecida a uma mistura a uma determinada composição, há uma determinada ocorrência de dissipação de calor, o que gera um aquecimento indesejável ao concreto e à argamassa, o que resulta num segundo fator indesejável que é a redução do tempo de pega ou o aumento da força necessária ao bombeamento (PILEGGI, STUDART, GALLO e PANDOLFELLI, 2001).

Estudos realizados em materiais cimentícios no estado fluido mostram que, quanto maior a quantidade de finos (elevada área superficial) inseridos em uma pasta maior será os esforços em se realizar a mistura. Isto é o feito reológico e caracteriza por uma dilatância (PILEGGI, STUDART, GALLO e PANDOLFELLI, 2001).

b) Transporte: logo após o processo de mistura inicia-se o processo de transporte que ocorre em regime turbulento. Isto é, essa etapa ocorre no interior de uma tubulação, com intenso esforço de cisalhamento dentro de um volume restrito. Nesta etapa consolida-se os conceitos teóricos de reologia aplicada em sistemas dispersos, onde inicia a necessidade de o material apresentar comportamento pseudoplásticos e/ou

tixotrópicos, que é uma característica de redução de resistência ao fluxo acompanhando o aumento do cisalhamento ao longo do tempo (PILEGGI, STUDART, PAGLIOSA, PANDOLFELLI, 2000).

Nesse processo conceitual, este comportamento está ligado à presença de partículas ultra-finas ($< 1\mu\text{m}$) na matriz do material. Em conjunto, forças de superfície influenciam tanto na movimentação como nas interações entre as partículas. No entanto, devido à natureza bifásica dos concretos e argamassas, logo levando em consideração os concretos a contribuição da presença do agregado graúdo devem ser considerados no seu comportamento. Isto é, quanto maior a quantidade dessas partículas grosseiras menor será a sua pseudoplasticidade e tixotropia da sua composição, uma vez que nesta condição as forças mássicas (fricção, colisão elástica, etc.), que aumentam com o tamanho da partícula (PILEGGI e PANDOLFELLI, 1999).

Uma das características para que um concreto e argamassa bombeáveis tenham um adequado comportamento reológico é que suas misturas sejam coesas e homogêneas. Isto é, não segregáveis durante o bombeamento.

Essa manutenção em suas integridades (coesão) no estado fluido depende fundamentalmente das ações de forças de superfícies, que atuam na superfície da matriz. Quanto menor o conteúdo da matriz no concreto maior será a facilidade da sua desagregação.

A maior densidade dos agregados sólidos em relação a matriz cimentícia (suspensão sólido + água), é um outro fator que induz a uma tendência natural da segregação durante o transporte. No entanto, algumas técnicas podem evitar essas separações de fases.

Uma das técnicas é a diminuição da diferença das densidades entre a matriz e os agregados, obtidos através do aumento da concentração de sólidos na matriz, ou utilizando agregados menos densos.

Outra técnica está ligada à cinética do processo de segregação. Isto é, quanto menor for a diferença de velocidade entre as fases, menor será a tendência destas partículas se separarem durante o transporte, quando submetidas às tensões de bombeamento. Matrizes com baixa viscosidade são cisalhadas em taxas superiores aquelas verificadas nos agregados, o que provoca segregação das partículas. Apesar de serem ressaltadas diversas vantagens de matrizes com alta viscosidade observa-se que o excesso dessa variável (viscosidade), resulta maiores esforços no processo de transporte do material, ocasionando o efeito dilatante do concreto. Ainda pode-se observar que a

elevação da viscosidade reduz consideravelmente seu efeito lubrificante da fricção entre os agregados que compõe a matriz e os agregados e a superfície interna da tubulação.

Ressalta-se ainda que esses fatores têm suas características bem mais acentuadas quando estão em situação de volume restrito. Isto é, quando o material se encontra no interior da tubulação durante o processo de bombeamento (SUNDQVIST, SELLGREN, ADDIE 1996).

c) Moldagem: nesta etapa final, as características de moldagem do concreto são avaliadas dentro da análise reológica intrínseca do material, aliadas às etapas anteriores dentro dessa última etapa. Faz-se necessário um profundo conhecimento da composição e do teor de água inseridos na matriz, por técnicas que envolvem vibração de alta energia ou podem, até mesmo, se comportarem como fluidos auto escoantes que fazem o preenchimento do fluido por ação da gravidade utilizando o seu peso próprio. No entanto, para que a técnica alcance um bom rendimento, é extremamente necessária que as etapas posteriores de mistura e transporte não provoquem consideradas alterações nas características físico-químicas dos materiais. (PILEGGI, PANDOLFELLI, 1999).

2.10.2 Argamassas e Concretos Projetados

O processo de projeção de concretos e argamassas à úmido, consiste basicamente no material se apresentar na forma de “spray”, sobre uma superfície rugosa, o que resulta em uma elevada taxa de cisalhamento e eficiente compactação do material (MARQUES, 2004).

Essa técnica foi desenvolvida na indústria da construção civil no início do século XX. E desde então, a técnica em conjunto com suas vantagens, só vem se desenvolvendo cada vez mais. Esse desenvolvimento traz consigo uma ampla difusão dos materiais cimentícios aplicados por projeção. Dentre as várias vantagens, destacam-se baixo custo, alta taxa de instalação, capacidade de automatizar o sistema e ampla utilização e reparos rápidos e recobrimentos de superfícies além de conferir um ótimo padrão estético de acabamento, traduzido em grande compactação do material durante sua aplicação. A Figura 2.17 apresenta toda a descrição esquemática do processo de aplicação de concretos e argamassas projetados (GLASSGOL, 2002) e (PILEGGI *et al.*, 2002).

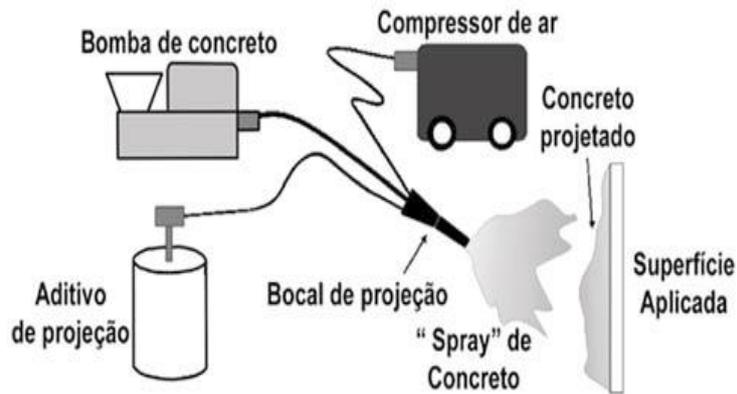


Figura 2.17 - Esquema do Processo de aplicação de pastas cimentícias por projeção a úmido. Fonte: MARQUES, (2004).

A técnica de projeção de materiais cimentícios a úmido como mostra a Figura 2.18 consiste basicamente em bombear o material previamente misturado com água até o local de aplicação. Na saída da tubulação é acoplado um dispositivo chamado de bocal de projeção que possui uma entrada para ar comprimido (alta pressão), acelerando o material formando um “spray” sobre a superfície de recobrimento. Nessa fase ocorre o efeito do aditivo reológico que causa um acelerado aumento de viscosidade do material, causando a perda imediata de fluidez do material, esse aditivo também é injetado pelo bocal de projeção. Esse processo resulta em uma elevada taxa de instalação e dispensa a utilização de moldes. Uma das principais características dessa técnica é a ocorrência de reduzida porosidade usualmente verificado no material aplicado, que é resultado da elevada compactação e menor teor de água que é utilizada no concreto.



Figura 2.18 - Ilustração esquemática da aplicação de materiais cimentícios com destaque dos quatro aspectos da técnica (a) bombeamento; (b) bocal de projeção; (c) spray e (d) consolidação. Fonte: D. VASQUES FILHO, (2004).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as matérias-primas e os procedimentos que foram utilizados para sua coleta e preparação. Também apresenta a metodologia utilizada na preparação das argamassas e sua moldagem nos corpos de prova. Serão encontrados nesse capítulo, as técnicas de caracterizações dos materiais utilizados nessa pesquisa, bem como seus equipamentos.

3.1 COLETA E PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS

3.1.1 Resíduo da Construção Civil (RCC)

A amostra de RCC, matéria prima que constitui a parte do agregado miúdo da argamassa foi coletada dentro e fora do campus universitário da universidade Federal do Pará, localizado no campus Belém-Pa.

Uma segunda parte do resíduo foi cedido por uma empresa de construção civil Figura 3.1, durante uma obra de reforma e demolição de parte de um prédio localizada na zona metropolitana de Belém-Pa.



Figura 3.1 - Resíduo da construção civil (RCC) em fase de coleta.

O material coletado foi classificado de acordo com a norma como **resíduos sólidos da construção civil classe “A”** que, de acordo com a norma dada pela resolução CONAMA nº 307/2002, inclui-se nesse tipo de material: tijolos, blocos

cerâmicos, concreto em geral, agregados pétreos, argamassas, telhas, camadas asfálticas de pavimentos e outros, adequados à execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base, bem como camada de revestimento primário.

Para o transporte e manuseio do RCC, desde a fonte geradora do resíduo, passando pelo seu processo de beneficiamento até o seu destino final, segue-se o procedimento técnico de acordo com a Norma Brasileira ABNT – NBR 15115/ 2004 e CONAMA nº 307/2002.

3.1.2 Processo de Beneficiamento do Resíduo da Construção Civil e suas Caracterizações

Nesta parte de pesquisa de campo procurou-se seguir a metodologia de proposta por Cardoso (2014), que estudou influência do teor de cinza volante na reologia de argamassas de assentamento, fabricado com reciclagem de resíduos.

O produto adquirido nesta fase da pesquisa foi obtido através de levantamento de informações de obras de ampliação, reforma e demolição dentro e fora da UFPA. Uma das amostras desse material foi obtida da antiga usina de biodiesel localizada no setor profissional que era anexa ao laboratório de engenharia química (LEQ), e na reforma e ampliação do prédio da faculdade de engenharia elétrica, localizados no campus Belém, identificados na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Ambiente de retirada de matéria prima (RCC) na UFPA.

Verificou-se que inicialmente as amostras de RCC encontravam-se na forma de “BLOCOS SÓLIDOS” com dimensões e geometrias variadas. Nesta fase preliminar de coleta há uma necessidade prévia da separação de alguns produtos indesejáveis à pesquisa que estão associadas ao material, tais como: metais, elementos graúdos de seixo, restos de tijolos, resíduos orgânicos (resto de madeira, papel, sacos plásticos, etc.)

Após esse processo as amostras já separadas dos materiais indesejáveis foram submetidas a um processo de retirada de umidade em estufa com temperatura de 110°C durante 24 h. Após a secagem, as mesmas tiveram de ser submetidas a dois processos de tratamentos abaixo:

- 1º Processo - moagem primária ou britagem
- 2º Processo - moagem secundária

O fluxograma da Figura 3.3 apresenta as principais etapas do beneficiamento das matérias primas.

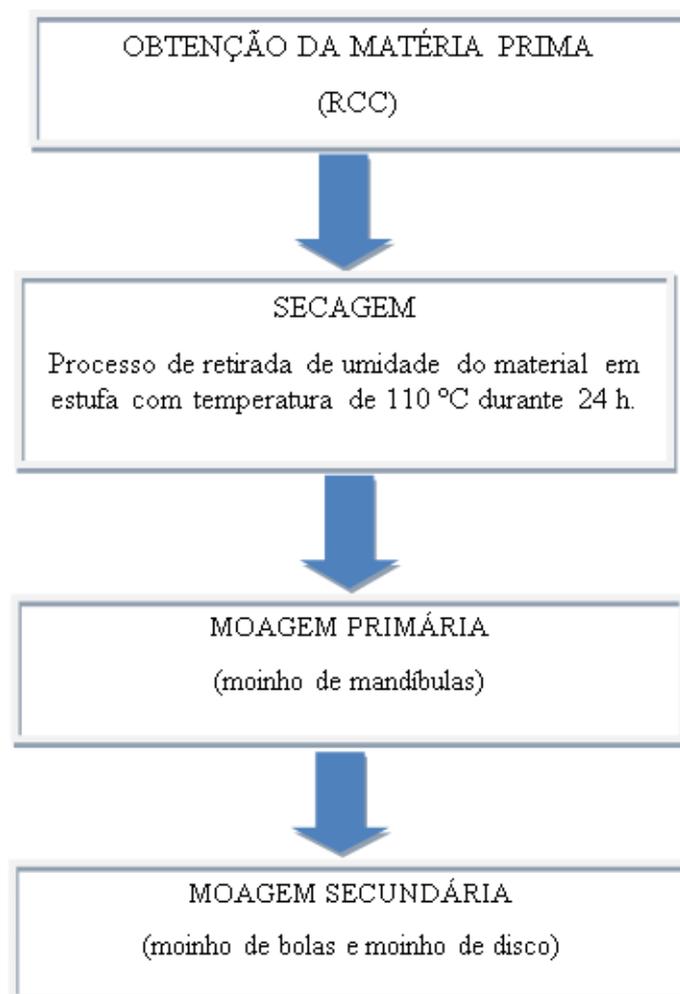


Figura 3.3 – Etapa de beneficiamento da matéria-prima.

3.1.2.1 Primeiro Processo - Moagem Primária

Moagem primária - Esta etapa consistiu-se em várias sub-etapas de aplicação de pressão ou de impacto sobre o material grosseiro, para posteriormente enquadrar-se ao tamanho adequado para ser alimentado a um equipamento de moagem primária. O tamanho máximo difere substancialmente com o equipamento empregado, e o produto obtido possui comumente cerca de 10 mm. Nessa fase utilizou-se um Britador de mandíbulas marca *Briterpa* (Modelo_1020 – Série 08), Figura 3.4 com abertura de descarte de 2,5 cm, provocando a quebra dos agregados maiores.

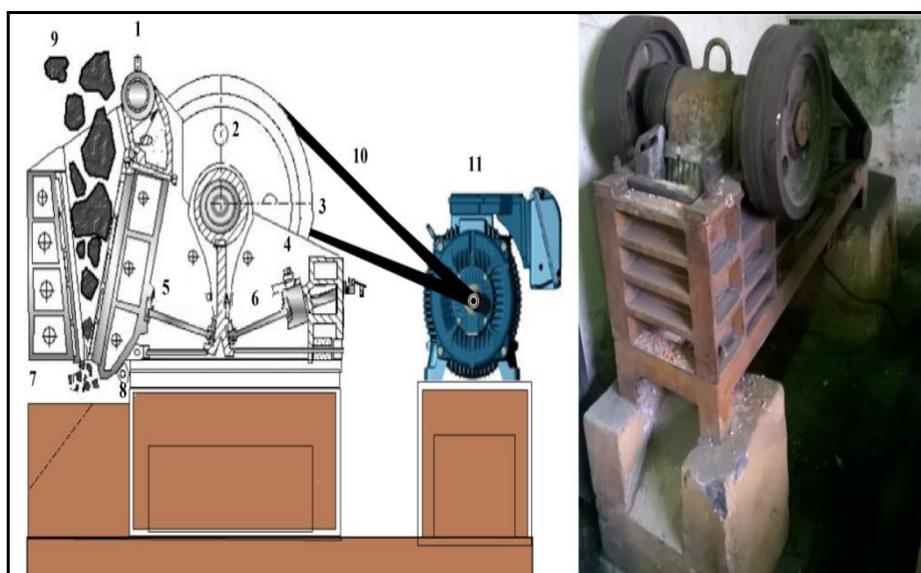


Figura 3.4 - Britador de mandíbulas, marca (BRITERPA, modelo 1020 - série 08).

3.1.2.2 Segundo Processo - Moagem Secundária

Nesta fase do processo, recorreu-se a metodologia da curva de moagem, para que a partir desse ponto se obtivesse o material com a granulometria desejada sem a necessidade de consumo de uma alta taxa de energia de fragmentação das partículas. Utilizaram-se dois tipos de moinho. O primeiro foi o Moinho de bolas, *Marca CIMAQ Modelo Work Index série (005)*, como mostra a Figura 3.5, em escala piloto com dimensões de 26 x 35 cm (diâmetro x comprimento).



Figura 3.5- Moinho de bolas marca CIMAQ (modelo Index série (005)).

O material foi inserido no moinho de bola em que foi carregado com 1 kg de material para aproximadamente 3 kg de bolas, operando a uma velocidade de rotação igual a 87% de sua velocidade crítica. Foi todo resíduo cominuído nos tempos de 0 a 210 minutos sob condições operacionais especificadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Condição específica de moagem para a etapa de cominuição.

**CARACTERÍSTICAS DA CARGA DE BOLAS UTILIZADAS
NO TESTE**

Nº de Bolas	Diâmetro (cm)	Peso (g)	Volume (cm³)
8	3.676	1825.84	208
12	2.879	1021.2	150
9	1.563	211.5	18
Total		3058.54	376

Para a obtenção de partículas com granulometrias menores utilizou-se um segundo Moinho com configuração em disco *Marca MARCONI Modelo MA700 série (100690037)*, Figura 3.6, abaixo.

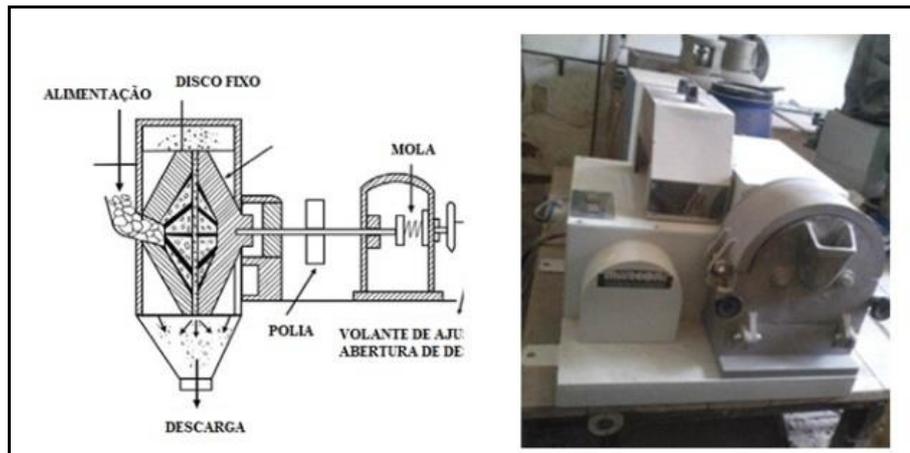


Figura 3.6 - Moinho de disco marca MARCONI (modelo MA 700 série 100690037).

Essas operações tiveram como objetivo final a redução do tamanho do agregado para que os mesmos ficassem enquadrados à produção dos traços das argamassas como mostra a Figura 3.7 abaixo, mostra a evolução de uma amostra representativa do material coletado até o processo final de beneficiamento.

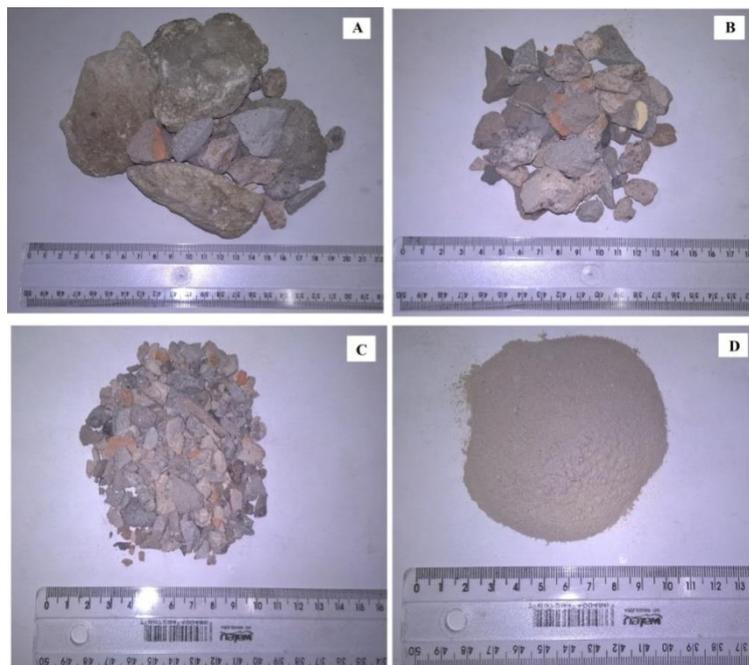


Figura 3.7 - Evolução das Etapas de cominuição do resíduo da construção civil (RCC).

Após as etapas de beneficiamento a matéria foi armazenada em sacos plásticos e estocados em tambores de plásticos com tampa rosqueável. E seguida foi utilizado 1Kg do material para a caracterização de suas características químicas e Físicas.

A caracterização química do (RCC), foi feita através da análise de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e Física através da análise granulométrica, massa específica e difração de raios-X (DRX) realizadas no laboratório de caracterização mineral raios-X (LCM) como mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela das técnicas de caracterização dos resíduos da construção civil (RCC).

ITENS	DETERMINAÇÕES	NORMAS ABNT
1	Análise granulométrica	NBR 7211/2005
2	Massa específica	093/94 – DNER
3	Análise Química	Espectrometria de fluorescência de raios-X
4	DRX	Difração de raio X

3.1.3 Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS)

O RMCS foi fornecido por uma empresa mineradora pertencente ao grupo Vale S.A. O beneficiamento do minério ocorre em um processo de lavra a céu aberto, o que gera bastante resíduo. O material foi coletado por seus funcionários que o retiraram do depósito de sedimentos perto de uma de suas barragens, localizados no município de Canaã dos Carajás, Brasil-PA. O resíduo se encontrava em condições seca de acordo com a Figura 3.8 A, B e C e foi acondicionado em sacos de 150 kg para transporte até o local de destino (laboratório de Engenharia Química/UFPA), onde foram realizadas análises físicas e químicas preliminares de granulometria, massa específica aparente, massa unitária e umidade, DRX e MEV como mostra a Tabela 3.3.



Figura 3.8 - Vista do ponto de lançamento do resíduo de minério de cobre (A), ponto de coleta do material (B) e material coletado (C). Fonte: MULLER e CASTRO FILHO, (2008).

Tabela 3.3 - Tabela de determinações para o resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS).

ITENS	DETERMINAÇÕES	NORMAS ABNT
1	Análise granulométrica	NBR 7211/2005
2	Massa específica	093/94 – DNER
3	Análise Química	Espectrometria de fluorescência de raios-X
4	DRX e MEV	Difração de raio X e microscopia eletrônica de varredura

3.1.4 Caracterização do RMCS a Possíveis Contaminantes (Metais Pesados)

Para verificar quais são os elementos presentes nos RMCS foi necessário identificar qual o nível de contaminação dos mesmos à saúde e o seu risco potencial ao meio ambiente. Para tal, realizaram-se os ensaios de absorção atômica em amostras representativas, o que possibilitou classificar o material segundo a norma NBR 10.004/2004 e apontar, se os resíduos presentes nas amostras encontram-se dentro dessa classificação.

O fluxograma do ANEXO 02 permitiu classificar inicialmente os RMCS como um Resíduo não-Perigoso, Classe II, cabendo então identificar se os resíduos são inertes (Classe IIB) ou não-inertes (Classe IIA). Como já abordado, a obtenção das soluções lixiviadas e solubilizadas permitirão identificar os elementos presentes nas amostras de RMCS.

3.1.5 Cinza Volante (CV)

A cinza volante usada foi oriunda da refinaria de alumina Hydro, localizada no município de Barcarena, no estado do Pará. A sua produção ocorre em caldeiras de leito fluidizado circulante a partir da combustão do carvão mineral, visto que na queima do carvão mineral é injetado na caldeira o calcário para a dessulfurização do material.

Inicialmente as amostras passaram por uma etapa inicial de desaglomeração em que foram secas em estufa a 105°C por 24 h e em seguida desagregadas no tempo de 5 min em moinho de bolas com o objetivo de tornar o material mais homogêneo. A Tabela 3.4 apresenta as principais técnicas de análises utilizadas para a caracterização da Cinza volante, neste trabalho.

Tabela 3.4 - Tabela de determinações para a cinza volante de carvão mineral (CV).

ITENS	DETERMINAÇÕES	NORMAS ABNT
1	Análise granulométrica	NBR 12.653 /2014
2	Massa específica	093/94 – DNER
3	Análise Química	Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)
4	DRX	Difração de raio X

3.1.6 Areia Quartzosa

As amostras de areia seguiram os requisitos empregados na norma ABNT NBR 7211, onde a matéria prima foi adquirida em estâncias de material de construção na cidade de Belém-PA entorno da Universidade Federal do Pará. A mesma foi classificada através de análise granulométrica clássica utilizando um conjunto de peneiras.

3.1.7 Cimento Portland (CP II-E32)

O cimento Portland utilizado foi classificado como tipo CP II – E 32, conforme a norma NBR11578/1991 é um cimento composto com escória, sendo amplamente utilizado em obras de construção e reformas da região. Foram realizadas análises mecânicas e físico-químicas, para efeito de comparação seguindo as orientações estabelecidas por normas brasileiras, bem como comparadas com resultados dos trabalhos de (Muller *et al*; 2016).

3.1.8 Caracterização dos Aditivos Poliméricos Poliacetato de Vinila (PVA) e Estireno Butadieno (SBR)

Os aditivos orgânicos poliméricos à base de PVA e SBR, são pertencentes a marca Grace-Rheoset. Os mesmos aditivos tiveram implementado seus estudos de caracterização no departamento de engenharia química da universidade federal do Pará e suas principais características constam na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Tabela de determinações físico-químicas dos aditivos PVA e SBR.

Aditivo	Função principal*	Aspecto e cor(visual)*	pH**	Massa específica g/cm³*	Viscosidade dinâmica (Pas)
PVA	adesivo	líquido de cor branco leitoso	4,0 - 6,0	1,025 +/- 0,02	0,00338
SBR	adesivo	líquido de cor branco leitoso	8,5 - 10,0	1,010 ± 0,02	0,00271

Fonte: *Grace-Rheoset.

**Esta FISPQ - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico.

Obs: está em conformidade com a NBR 14725

3.2 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIAS UTILIZADAS

3.2.1 Análise Granulométrica dos Materiais

Parte da caracterização de um material compreende a sua granulometria, em que se determina o tamanho da partícula e a determinada faixa de tamanho em que essa ocorre em uma determinada frequência (LIMA e DA LUZ, 2001).

Para a análise granulométrica das matérias primas foi utilizado o equipamento laser *particle sizer analysette 22* Fritsch com software MaScontrol para a aquisição dos dados experimentais.

Apenas para a areia foi realizada a análise clássica de peneiramento de acordo com as respectivas normas da Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) que são: NBR 6457 e NBR 7181, utilizando a sequência de peneiramento mesh na série #16, #32, #60, 100, #150, #200, #270, #325, #400 e #500.

3.2.2 Medidas das Densidades Relativas ou Real de RCC, CV e RMCS (Através do Método da Picnometria)

As medidas de densidade real ou relativas das amostras foram realizadas de acordo com a norma 093/94 – DNER. Essa técnica é utilizada para medir a densidade de solos e minérios através do método do picnômetro. Para calcular a densidade das amostras de RCC, CV e RMCS, foram utilizadas amostras representativas das originais em que foram elaboradas as argamassas com base na Equação 3.1.

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad (3.1)$$

Onde:

d_s - densidade dos sólidos;

A_1 - massa do picnômetro

A_2 - massa do picnômetro + amostra;

A_3 - massa do picnômetro + amostra + água;

A_4 - massa do picnômetro + água.

3.2.3 Caracterização Mineralógica

3.2.3.1 Difração de raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, em que sua aplicabilidade se encontra em diversas áreas do conhecimento principalmente na engenharia química, na geologia, engenharia metalúrgica e ciências dos materiais entre outros (SCOOG *et al*; 2012)

As amostras dos materiais utilizados nesse trabalho foram avaliadas a partir da metodologia convencional de DRX (pó seco). Inicialmente as amostras foram pulverizadas em gral de ágata, em seguida o material, foi transferido cerca de 0,5 g para portas-amostra de aço inox, utilizado como suporte, todo o conjunto foi fixado em uma base metálica. Depois do processo de preparo dos materiais as amostras seguiram para a realização dos ensaios. As análises foram realizadas em um difratômetro de raios-X do modelo *X'Pert Pro MPD (PW 3040/60) PANalytical*, com goniômetro PW3050/60(θ - θ) e com tubo de raios-X cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$) modelo PW3373/00, foco fino longo, filtro $K\beta$ de Ni, detector X'Celerator RTMS (*Real Time Multiple Scanning*) no modo *scanning* e com *activelength 2,122°*. Foram usadas as seguintes condições instrumentais: Varredura 4° a $75^\circ 2\theta$, 40 kV, 30 mA, passo $0,02^\circ$ em 2θ e tempo/passo de 20 s, fenda fixa $1/4^\circ$ e anti-espalhamento $1/2^\circ$, máscara 10 mm, movimento da amostra spinning, com 1 rps. O equipamento utilizado pertencente ao laboratório de geociências da UFPA.

3.2.3.2 Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX)

A análise de espectrometria de fluorescência de raios X foi realizada no espectrômetro WDS sequencial, modelo *Axios Minerals* da marca *PANalytical*, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW.

A amostra foi analisada em dois modos de preparação:

a) Disco fundido: 1 g de amostra + 6 g de fundente (Tetraborato de lítio – Li₂B₄O₇), mistura fundida a 1000°C por 10 min.

b) Pastilha prensada: 3 g de amostra + 0,9 g de aglomerante (cera de parafina), mistura prensada com uma carga de 20 toneladas.

As aquisições e tratamento de dados foram realizados através do software Super Q Manager da *PANalytical*.

3.2.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV) possui grande versatilidade para observação e análise microestruturais de materiais sólidos (DEDAVID, 2007)

Foram realizadas análises microestruturais dos resíduos que foram utilizados na pesquisa bem como as amostras dos corpos de prova após a fratura, para isso utilizou-se um Microscópio eletrônico de varredura da marca HITACHI, modelo TM 3000, Brasil.

3.2.5 Análises Térmicas (Curvas TG/DTA e DSC)

As curvas TG/DTA foram obtidas usando uma termobalança *Shimatzu* modelo DTG60. Foram pesados cerca de (5±0,5mg) de massa em pó de Cimento CP2 E-32 em misturas separadas dosadas (CP2 E-32 + PVA) e (CP2 E-32 + SBR), e então submetidos a análise de 25°C até 700°C, com atmosfera dinâmica de nitrogênio, e fluxo de 10mL.min⁻¹, com razão de aquecimento de 10°C.min⁻¹ em cadinho de alumina.

3.2.6 Elaboração dos Corpos de Prova Cilíndricos

Para a confecção dos corpos de prova, Figura 3.9, a metodologia foi baseada na norma NBR - 7215 (ABNT, 2004) adaptada, sendo utilizado moldes cilíndricos de policloreto de vinila (PVC) com dimensões de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro

A partir dessa dimensão foi calculado o volume de cada forma, a fim de que com os valores correspondentes aos traços possam ser dimensionadas as quantidades dos materiais que entraram na composição da argamassa.

No **APÊNDICE A, Tabela A.1** apresenta a massa total da mistura como referência para elaboração de 1 corpo de prova.



Figura 3.9 - Modelo e dimensão dos corpos de prova Elaborados na pesquisa.

3.2.7 Procedimento Experimental 01- Proporção de Água Ideal na Mistura

O fluxograma da Figura 3.10, apresenta as principais etapas experimentais da pesquisa.



Figura 3.10 - Fluxograma das principais etapas experimentais da pesquisa.

Nos primeiros estágios da pesquisa foi necessário confeccionar os traços de referência, a fim de ter a exata proporção de água era necessária para confecção dos primeiros traços.

Para isso foi elaborada uma pesquisa experimental e teórica de artigos científicos e manuais de obras para que as argamassas tivessem suas características dentro das especificações de moldagem. Esse resultado mostrou que a quantidade de água necessária para a composição dos traços ficaria ente 28 e 40% de água na mistura, fator esse que dependeu da matéria prima utilizada na pesquisa sendo adaptada de modo experimental de acordo com o tempo de trabalho, determinado pelos efeitos de cura do material, pois cada resíduo possui uma maior ou menor capacidade de absorção de água pelo sistema.

3.2.8 Procedimento Experimental 02 – Fabricação dos Corpos de Prova Obtidos Através da Matriz de Experimento Utilizando o RMCS e RCC

Nesta etapa da pesquisa foram elaboradas duas matrizes de planejamento, em que foram fabricados 10 traços de argamassa. Em cada matriz os valores numéricos de cada análise realizada nesta etapa como resistência à compressão, absorção aparente porosidade aparente e massa específica aparente encontram-se no **APÊNDICE B, Tabela B.1 e B.2**, cabe ressaltar que este experimento teve como base os trabalhos de (BAHIENSE, 2008), que utilizou a mesma matriz, confeccionados a partir de resíduo de cerâmica vermelha proveniente de cerâmicas da região de Campos dos Goytacazes-RJ.

O principal objetivo desse experimento foi realizar um estudo completo dos dois tipos de resíduos e suas seqüências de misturas como mostra as Tabelas 3.6 e 3.7 em termos de Resistência a compressão e porosidade em corpos de prova cilíndricos para serem posteriormente dosados com polímeros PVA e SBR, foram utilizados os seguintes tipos de resíduos:

- Resíduo 01 – resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS);
- Resíduo 02 – resíduo da construção civil (RCC + areia);
- Para o 02 (RCC + areia), cabe ressaltar que a correção da granulometria do agregado miúdo RCC, foi feito com a inserção de 25% de areia média em cada matriz de mistura que incluiu o RCC, pois de acordo com ANGELIM *et al.* (2003) constataram que a adição de finos às argamassas diminui a resistência mecânica, da mesma.

É de fundamental importância destacar que para todos os traços da matriz de planejamento um terceiro resíduo industrial foi adicionado as misturas que foi a cinza volante de carvão mineral (CV).

As características adotadas para os traços a serem escolhidos para serem dosados com polímero seguiu as seguintes escolhas em termos de reaproveitamento:

1. maior uso de resíduo;
2. menor utilização de cimento Portland;
3. maior resistência a compressão.

Tabela 3.6 - Tabela de proporções para as argamassas elaboradas a partir do rejeito de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS).

Matriz de análise para o resíduo 01 (RMCS)				
Sequência de análise	TRAÇOS	Porcentagem em massa		
		CIMENTO (%)	RMCS (%)	CV(%)
6	1º traço	0,2	0,75	0,15
5	2º traço	0,15	0,7	0,15
1	3º traço	0,2	0,7	0,1
7	4º traço	0,13	0,73	0,13
9	5º traço	0,12	0,77	0,12
2	6º traço	0,1	0,8	0,1
8	7º traço	0,17	0,72	0,12
10	8º traço	0,12	0,72	0,17
3	9º traço	0,1	0,7	0,2
4	10º traço	0,15	0,75	0,1

Tabela 3.7 - Tabela de proporções para as argamassas elaboradas a partir do rejeito da construção civil (RCC).

Matriz de análise para o resíduo 02 (RCC)				
Sequência de análise	TRAÇOS	Porcentagem em massa		
		CIMENTO	RCC + AREIA	CV
7	1º traço	0,13	0,73	0,13
8	2º traço	0,17	0,72	0,12
1	3º traço	0,2	0,75	0,15
3	4º traço	0,2	0,7	0,1
10	5º traço	0,12	0,72	0,17
4	6º traço	0,15	0,75	0,1
9	7º traço	0,12	0,77	0,12
5	8º traço	0,15	0,7	0,15
6	9º traço	0,1	0,75	0,15
2	10º traço	0,1	0,8	0,1

3.2.9 Procedimento Experimental 03 – Inserção de Polímero PVA e SBR nas Misturas para Fabricação dos Corpos dos Melhores Traços Obtidos Através da Matriz de Experimento Utilizando o RMCS e RCC

Nesta etapa da pesquisa, os traços dos experimentos 02 que utilizaram o RMCS e RCC e que apresentaram melhores desempenhos em termos de resistência a compressão foram aditivados com polímeros PVA e SBR. Para isso, foram elaboradas pesquisas de campo para representar o que ocorre nos diversos canteiros de obras da cidade na avaliação de aditivos nas argamassas, na maioria dos casos não se encontrou

um padrão exato para tal medida, devido a dinâmica de produção que ocorre na maioria dos canteiros pesquisados. No entanto, para se alcançar um parâmetro técnico na pesquisa, procedeu-se a diluição de 1:5 aditivo/água, nas argamassas o que é recomendada pela grande maioria dos fabricantes.

Todas as amostras analisadas foram realizadas em um misturador mecânico marca SOLDTEST, acoplado a uma argamassadeira com capacidade de 130 litros no tempo de cinco minutos. A água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento da UFPA.

Após o preparo, as misturas foram deixadas em repouso por 15 minutos para minimizar os efeitos da homogeneização, o que provoca a formação de bolhas de ar que se tornam um interferente quando as misturas são inseridas nos moldes dos corpos de prova e nas posteriores análises reológicas.

3.2.10 Caracterização Físico-Mecânica no Estado Endurecido

3.2.10.1 Resistência à Compressão

Em um projeto de fabricação de argamassa e concreto, a resistência é uma das principais propriedades avaliadas. Isto porque comparada com a maioria das propriedades a resistência é relativamente fácil de ser ensaiada. Contudo muitas propriedades das argamassas são diretamente relacionadas à resistência. Portanto, podem ser deduzidas a partir dos dados de resistência. A resistência a compressão aos 28 dias, determina através de um ensaio padrão de compressão uniaxial, é aceita universalmente como índice geral de resistência da argamassa e concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994)

Os ensaios para determinação da resistência a compressão axial dos CP's das argamassas, foram realizados nos tempos de 7,14 e 28 para o 1º experimento e para os demais experimentos 2 e 3 as argamassas foram avaliadas somente em 28 dias de cura.

Para o ensaio de resistência à compressão utilizou-se máquina universal Emic SSH300, célula Trd 30 de acordo com a norma ABNT NBR 13279, no Laboratório de Resistência dos Materiais do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Os corpos de prova tiveram seus resultados registrados no software TESC 3.04. A carga aplicada foi crescente em que todo o esforço de compressão foi distribuído de

forma transversal em toda seção do corpo de prova. Na Figura 3.11 é mostrado o ensaio de resistência à compressão em que mostra a prensa hidráulica e o corpo de prova sendo rompido.

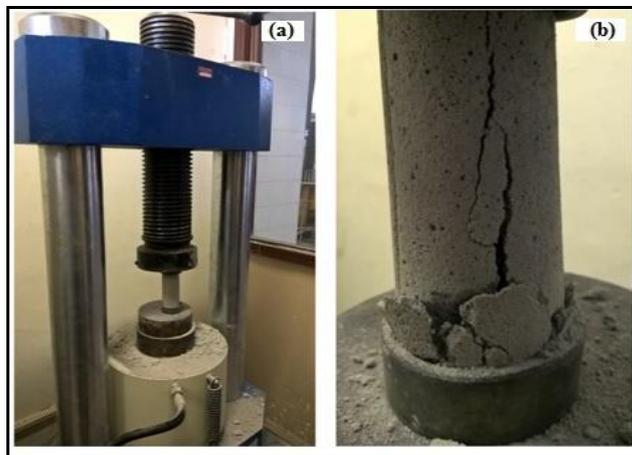


Figura 3.11 - Prensa hidráulica modelo (EMIC SSH30- célula TRD30) (a) e corpo de prova rompido (b).

3.2.10.2 Absorção Aparente

Para os ensaios de absorção aparente, porosidade aparente, massa específica os CP's foram pesados em balança analítica obtendo-se a massa seca. Logo em seguida foram mergulhados em uma caixa plástica contendo água por 24 horas Figura 3.12 (a). Após esse período os CP's, foram retirados do recipiente e pesados para se obter o valor da massa úmida. Para a obtenção do valor da massa imersa, utilizou-se uma balança analítica em conjunto com um dispositivo de madeira conectada a uma haste de aço, como mostra a Figura 3.12 (b), o material a ser pesado ficou imerso dentro de um recipiente plástico contendo água suficiente para cobrir o material.

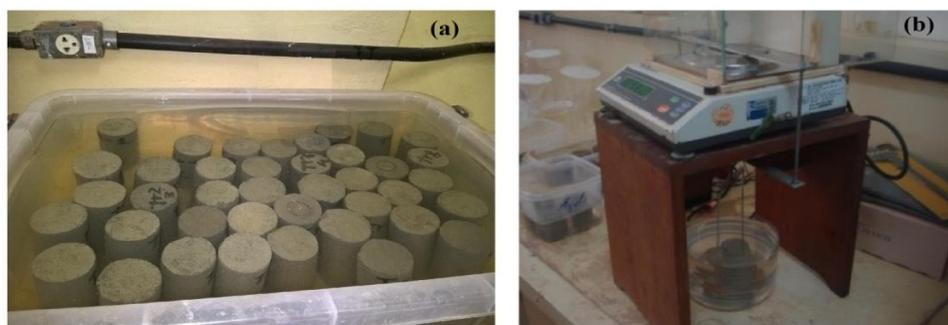


Figura 3.12 - (a) Corpos de prova em imersão por 24Hs e (b). dispositivo para medição da massa imersa dos cp's.

É representada pelo quociente da massa absorvida de água pelo corpo de prova saturado de água pela massa seca do corpo de prova. Calcula-se em %, de acordo com a Eq. 3.2.

$$Aa (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde:

Aa - Absorção aparente

Mu - Massa úmida (g)

Ms - Massa seca (g)

3.2.10.3 Porosidade Aparente

É representada pelo quociente do volume de poros abertos, de cada corpo de prova, pelo volume aparente do mesmo. Calcula-se em %, de acordo com a Eq. 3.3.

$$Pa(\%) = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde:

Pa - Porosidade aparente

Mu - Massa úmida (g)

Ms - Massa seca (g)

Mi - Massa imersa (g)

3.2.10.4 Massa Específica Aparente (MEA)

É representada pelo quociente da massa, de cada corpo de prova seco, pela diferença da massa úmida com a massa imersa de cada corpo de prova. A massa específica foi calculada através da Equação 3.4.

$$MEA = \frac{Ms}{Mu - Mi} \cdot \rho_{H2O} \quad (3.4)$$

3.2.11 Análises Reológicas

No processo de desenvolvimento da pesquisa buscou-se a melhor forma de se avaliar as argamassas no estado fresco, não só do ponto acadêmico, mas em contrapartida se verificar a sua aplicação em termos reológicos no campo de trabalho. Para isso, buscou-se a melhor forma tecnológica de instrumentação científica que certifique o melhor equipamento para essa avaliação.

Buscou-se dentro da literatura parâmetros como: alta consistência, baixa consistência, bombeava e projetadas.

Logo verificou-se que o viscosímetro rotacional cobre toda necessidade de avaliação desse material no estado fresco como mostra a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Tabela de melhores parâmetros de avaliação de viscosidade de argamassas.

Ensaio	Tipos de ensaios	Parâmetros reológicos	Argamassa			
			Alta consistência	Baixa consistência	Bombeáveis	Projetadas
Mesa de consistência Dropping	Mono-ponto	Viscosidade	X	X		
Cone de penetração Gtec-test	Mono-ponto	Tensão de escoamento	X			
Flow cone	Mono-ponto	Viscosidade	X	X		
Plastometro de Voss	Mono-ponto	Viscosidade	X			
Vane test	Mono-ponto	Viscosidade	X	X		
Squeeze Flow	Multi-ponto	Tensão de escoamento	X	X		
Reômetros e Viscosímetros	Multi-ponto	Tensão de escoamento	X	X	X	X

Fonte: BARBOSA, (2010) *Mono – Ponto: ensaio que está relacionado com a taxa de cisalhamento, permitindo a mensuração indireta de um parâmetro reológico fundamental (tensão de escoamento pó viscosidade).

Para a determinação da viscosidade dinâmica e das curvas de fluxo utilizou-se um Viscosímetro rotacional (HAAKE *Viscotester* modelo VT 550), como mostra a Figura 3.13. O equipamento possui diferentes modelos de *spindles*, que possuem variação geométrica conforme a viscosidade de cada fluido. Para essa pesquisa foi

utilizado a configuração cilindros coaxiais copo SV e cilindros SV₁, Figura 3.14, as amostras inicialmente foram inseridas em um banho termostático com precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ acoplado ao viscosímetro, na qual foi programada uma temperatura constante de 28°C .



Figura 3.13 - Viscosímetro VT 550 acoplado ao banho térmico.



Figura 3.14 - Sistema de medição de viscosidade aparente copo SV e *Spindle* SV1.

Para a avaliação da Influência do teor de agregados nas misturas água cimento, avaliou-se três tipos de agregados inseridos nas argamassas, que foi o RCC, RMCS e a CV. Foi preparada uma pasta cimentícia, na relação (Cimento/H₂O), na proporção de 40%, e a partir dessa formulação variou-se a quantidade de resíduos nas proporções de 10 à 40%, em seguida cada mistura foi cisalhada a uma taxa constante de 100s^{-1} .

Na obtenção das curvas de trabalhabilidade, utilizou-se a metodologia da rampa controlada em que programou-se no software do viscosímetro uma taxa de cisalhamento em valor constante de $53,4\text{s}^{-1}$ no tempo de 5 segundos de rotação com

intervalos de parada de 15min, essa análise tem como objetivo a verificação do máximo tempo em que a argamassa continua fluida e trabalhável.

Para a obtenção das áreas das histereses reológicas e obtenção dos modelos reológicos de fluidos não newtonianos das argamassas, utilizou-se a metodologia proposta por Park, *et al*; (2005), adaptada. Nesta metodologia avaliou-se os parâmetros reológicos através da curva de fluxo (ascendente e descendente), isto é:

- Curva ascendente - Rampa de aumento de taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de 0 a 600 s⁻¹ em 180 s
- Patamar - Permanência a 600 s⁻¹ por 30 s;
- Curva descendente - Rampa de diminuição de taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de 600 a 0 s⁻¹ em 180 s.

Os valores de tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade aparente foram ajustados a modelos reológicos independentes do tempo de *Ostwald-de-Waele* (Lei da Potência), Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Power Law como mostra a Tabela 3.9, sendo utilizado para isso o próprio software computacional do equipamento (*Thermo Scientific™ HAAKE™ RheoWin™ Measuring and Evaluation Software*).

Tabela 3.9 - Principais modelos reológicos avaliados neste trabalho.

Modelo	Equação	Parâmetros
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Viscosidade plástica (η_p)
Herschell-Bulckley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Índice de consistência (K) Índice de comportamento (n)
Casson	$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + (\mu_\infty \cdot \dot{\gamma})^{0,5}$	Tensão limite de escoamento (τ_0) Viscosidade limite para altas taxas de cisalhamento (μ_∞)
Power Law	$\tau = a \dot{\gamma}^b$	Índice de consistência (a) Índice de comportamento (b)

Fonte: Machado, 2002.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão descritos os resultados e discussões das caracterizações das matérias primas bem como os três tipos de materiais obtidos a partir do reaproveitamento dos resíduos sólidos (argamassas e argamassas poliméricas).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS PRIMAS

4.1.1 Análise Granulométrica do Resíduo da Construção Civil (RCC)

O prévio conhecimento do tamanho das partículas das matérias primas, é um parâmetro fundamental na elaboração dos materiais cimentícios, pois dependendo do seu diâmetro médio, a reação química pode sofrer variação

A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos na análise granulométrica do RCC, verifica-se que esses valores se encontram na faixa 75,65 μm o que permite enquadrar como um tipo de padrão de areia fina de acordo com a norma ABNT – NBR 6502.

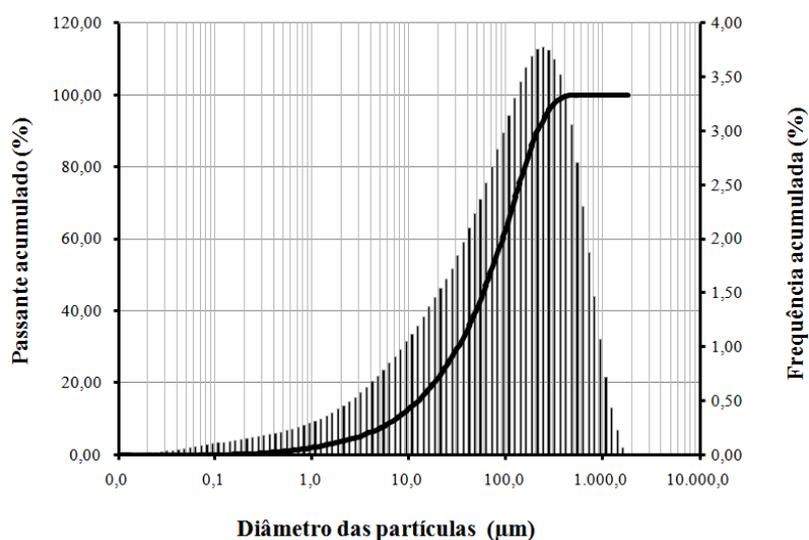


Figura 4.1 - Distribuição do tamanho de partícula do resíduo da construção civil (RCC).

A Tabela 4.1 apresenta as características físicas obtidas do resíduo da construção civil (RCC) em relação ao diâmetro médio das partículas, limites de Atterberg, massa específica e teor de umidade.

Tabela 4.1 - Característica Física do resíduo da construção civil (RCC).

ENSAIOS	RESULTADO	NORMAS TÉCNICAS
Diâmetro médio (μm)	75,65	NBR 6502 (ABNT 1993)
Limites de Atterberg	Não plástico	NBR6459 (ABNT, 2016); NBR 7180(ABNT 2016)
Massa específica (g/cm^3)	1,3846	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Teor de umidade (%)	0,92	NBR NM 24 (ABNT, 2003)

4.1.2 Difração de raios X (DRX) do Resíduo da Construção Civil (RCC)

A composição mineralógica do RCC estudado através da difratometria de Raio-X apresentada na Figura 4.2, mostrou as fases cristalinas presentes em que se encontrou uma maior predominância do Quartzo (SiO_2), apresentando um pico mais ascendente em relação aos picos de Calcita (CaCO_3) e Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), presentes na amostras, o resultado apresentado demonstrou semelhança com os resultados da análise de FRX.

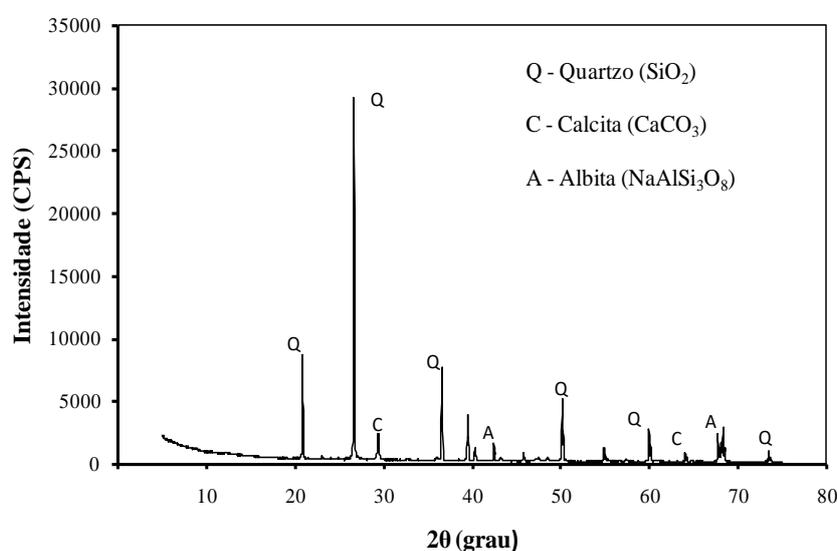


Figura 4.2 - Difratograma de raios X do resíduo da construção civil (RCC).

4.1.3 Espectrofotometria de Fluorescência de raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Resíduo da Construção Civil (RCC)

Os resultados de FRX apresentados na Tabela 4.2 mostram que o RCC é composto, em sua maioria, por óxidos de Silício (SiO_2), em concentrações de

aproximadamente 77,08%, isto é coerente, devido o resíduo beneficiado ser oriundo de rebocos e concretos, sendo que para o concreto não estrutural na sua elaboração é usada em média uma medida de cimento, três medidas de agregado graúdo e uma de areia. A presença de CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO, K₂O, em baixas concentrações deve ser advindo de outras fontes ou do próprio cimento que foi utilizado na antiga obra, haja visto que a argila também é utilizada em sua fabricação.

Tabela 4.2 - Fluorescência de raio - X do resíduo da construção civil (RCC).

Composto	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	TiO	K ₂ O	PF
Concentração m/m(%)	2,46	9,21	1,18	77,08	0,96	0,49	0,12	7,53

A Microscopia Eletrônica de Varredura do resíduo da construção civil Figura 4.3, permitiu observar que se trata de um material com diferentes geometrias de suas partículas, e a existência de partículas soltas, não aderidas, além da formação de agregados maiores, o que reflete uma interação mediana entre as partículas.

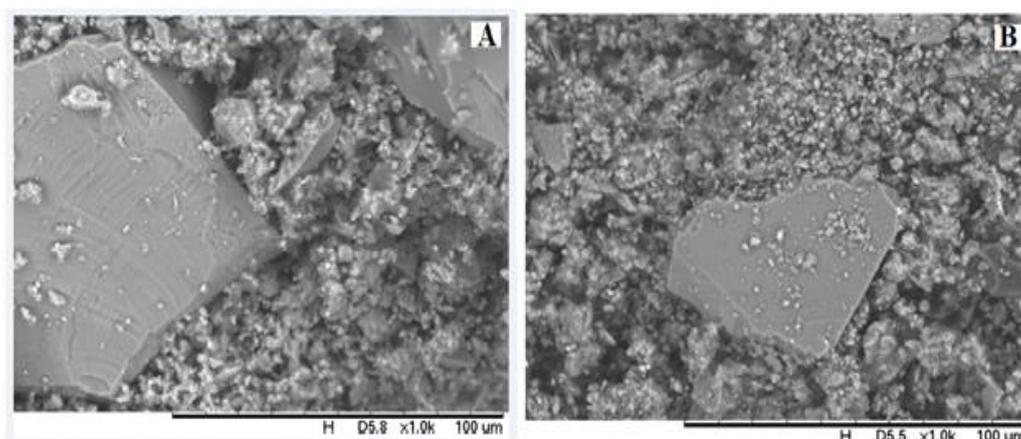


Figura 4.3 - Microscopia de eletrônica de varredura do resíduo da construção civil (RCC).

Baseado nos resultados obtidos das caracterizações do RCC acima pode-se dizer que o resíduo pode ser utilizado como agregado miúdo em argamassas, sendo para isso apenas uma correção de sua granulometria com a inserção de 25% de areia média em cada matriz de mistura.

4.1.4 Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS)

4.1.4.1 Análise Granulométrica do Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS)

De acordo com os resultados da análise granulométrica apresentadas na Figura 4.4, os mesmos revelam a predominância da fração areia em relação aos tamanhos dos grãos, sendo que 20% do total do material é caracterizado como areia fina e 70% como areia média. No entanto, são significativas as proporções de 10% silte nas amostras coletadas, não apresentando quantidades de argila e cascalho e areia grossa conforme a classificação ABNT, NBR 6502 para materiais constituintes de solo (ANEXO 01). Este resultado confirma um prévio tratamento da matéria prima como um critério rigoroso de seleção de finos para que os mesmos possam ser reaproveitados na elaboração de argamassas e concretos aplicados de forma direta na construção civil.

Quanto ao tamanho médio dos grãos a análise revelou que o valor de diâmetro médio (d_{50}) encontra-se em torno de 125 μm que, de acordo com a norma NBR 7211, o resíduo se enquadra como agregado miúdo em argamassas.

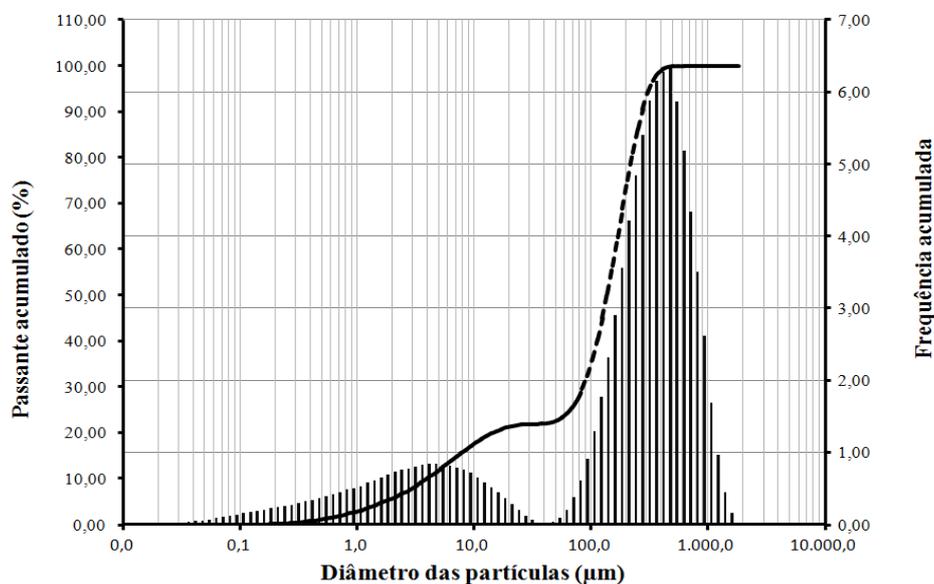


Figura 4.4 - Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de minério de cobre (RMCS)

A Tabela 4.3 apresenta as características físicas obtidas do resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS) em relação ao diâmetro médio das partículas, limites de Atterberg, massa específica e teor de umidade.

Tabela 4.3 - Características Físicas do resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS).

Ensaio	Resultados	Normas técnicas
Diâmetro médio (μm)	125 μm	NBR 7211
Limites de Atterberg	Não plástico	NBR 6459 (ABNT,2016); NBR 7180(ABNT 2016)
Massa específica (g/cm^3)	1,345	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Teor de umidade (%)	0,94	NBR NM 24 (ABNT,2003)

4.1.4.2 MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura do Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado

Os resultados obtidos através da Microscopia de Varredura (MEV), apresentadas na Figura 4.5, mostram duas imagens (A) e (B), em que nelas pode se observar que as amostras dos RMCS possuem diversos formatos e tamanhos, apresentando formações de porções aglomeradas entre si. Uma das possíveis causas da formação dessas porções aglomeradas é que o RMCS possui uma granulometria bastante diversificada com partículas de tamanhos maiores e menores (grossos e finos) intercaladas entre si.

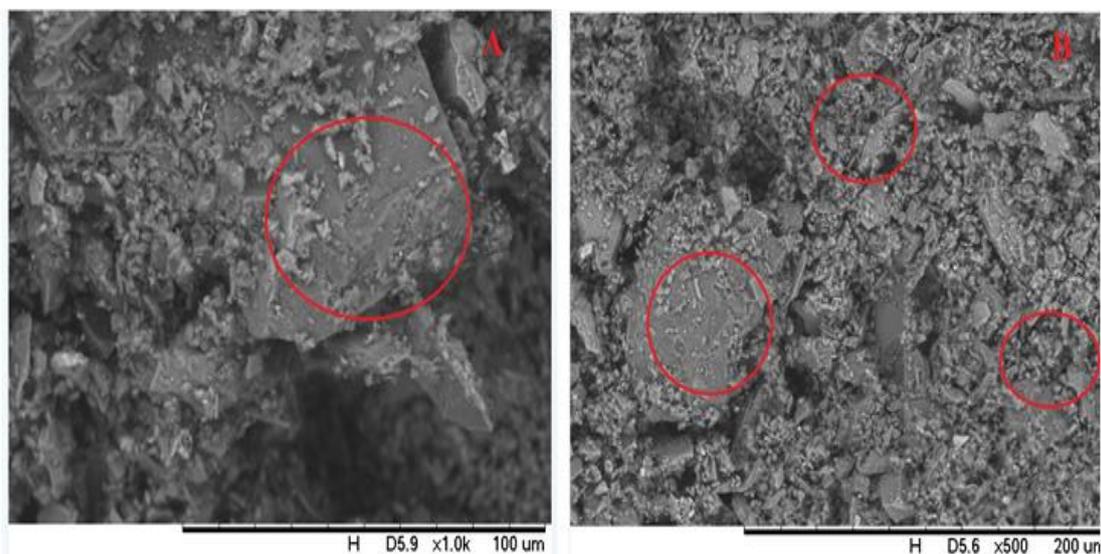


Figura 4.5 - Microscopia eletrônica de varredura do rejeito de minério de cobre (RMCS).

4.1.4.3 Difração de raios X (DRX) do Resíduo do Rejeito de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS)

Os resultados obtidos através da análise de DRX na Figura 4.6, mostraram de forma significativa três principais picos de composições minerais presentes na amostra em estudo, onde esses foram classificados como Quartzo (SiO_2), destacando-se como principal na amostra, seguidos de Albita ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), Clinocloro ($(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), Calcopirita (CuFeS_2), Muscovita ($\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$), Hornblenda ($\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg,Fe})_4(\text{Al,Fe,Ti})\text{AlSi}_8\text{AlO}_{22}(\text{OH},\text{O})_2$) e Magnetita (Fe_3O_4).

Cabe reforçar que o quartzo e a albita são os minerais que possuem os picos com maior intensidade na composição. A presença do mineral de quartzo pode ser confirmada nos difratogramas devido a presença dos picos em $20,834^\circ$ o maior em $26,651^\circ$ e $50,108^\circ$ grau. A presença do mineral albita também é confirmada nos difratogramas devido a ocorrência dos picos em $13,847^\circ$, $23,527^\circ$ e o maior em $28,097^\circ$, que são picos característicos deste mineral.

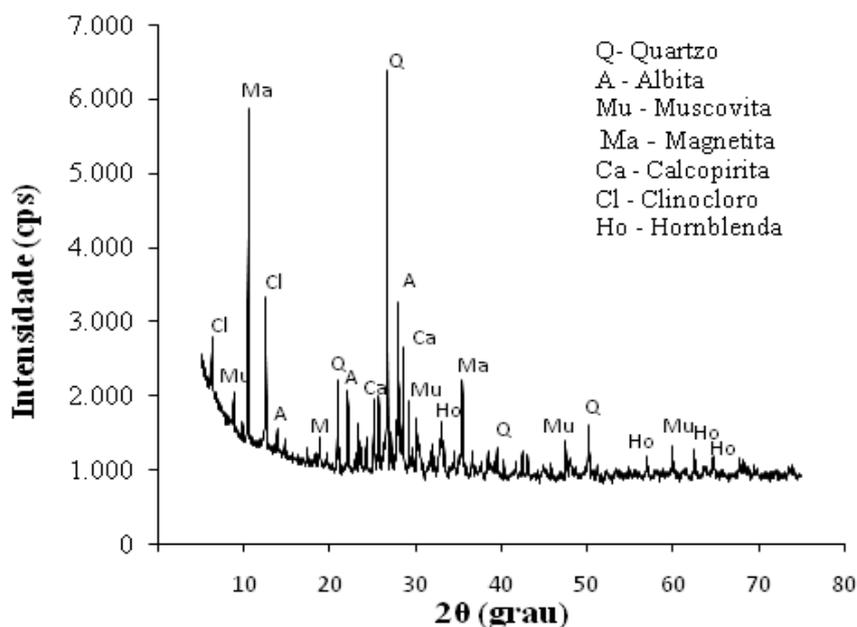


Figura 4.6 - Difratograma do resíduo de minério de Cobre sulfetado (RMCS).

4.1.4.4 - Espectrofotometria de Fluorescência de raios X (FRX) do RMCS

Os resultados de fluorescência de raios-X do RCMS mostrados na Tabela 4.4, mostraram que de uma forma geral ocorre a predominância de óxidos de silício (SiO_2) com 44,49 % evidenciando sua origem proveniente do processo de exploração do cobre

sulfetado que se dá em grandes profundidades na crosta terrestre. Os demais óxidos identificados foram: Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , MnO , SO_3 e K_2O e podem ser advindos de outras etapas do processo de beneficiamento do cobre.

Tabela 4.4 - Análise de Fluorescência de raio -X do RMCS.

Material	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	MnO	TiO_2	SO_3	P_2O_5	K_2O
RMCS	44,49	11,19	9,46	23,05	-	5,34	0,007	-	1,7	-	0,87

4.1.4.5 - Classificação dos Resíduos dos RMCS

Seguiram os procedimentos adotados para a classificação inicial do resíduo. O fluxograma apresentado no **ANEXO 02** da norma NBR 10004 (ABNT, 2004) faz alguns questionamentos referentes ao resíduo que está sendo investigado, os quais foram respondidos através de perguntas e respostas aqui:

a) o resíduo tem origem conhecida?

Resposta: SIM, o resíduo tem origem e localização conhecida

b) Os elementos presentes nos resíduos constam no anexo A ou B da norma?

Resposta: Não existem elementos presentes nos resíduos que constem nos anexos A ou B da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

c) O resíduo possui características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade?

Resposta: Não existem tais características nos resíduos. Portanto, os resíduos não são considerados perigosos.

d) Como os resíduos são considerados não-perigosos, Classe II, eles são inertes ou não-inertes e vem a pergunta: os resíduos possuem constituintes que são solubilizados em concentrações superiores aos elementos presentes no anexo G?

Para responder a essa questão, foi necessário analisar os metais presentes a partir das soluções lixiviadas e solubilizados das amostras de RMCS como mostra a Tabela 4.5 e analisá-los por meio da técnica de espectrometria de absorção atômica para identificação dos elementos presentes na solução e compará-los com os limites máximos estabelecidos nos Anexos G e F pertencentes a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Tabela 4.5 - Tabela de análise de metais para o resíduo de minério de cobre sulfetado (RMCS).

Resíduo de Minério de Cobre Sulfetado (RMCS)				
Parâmetros	Unidade	Resultados	Observações	L.D
Ferro (Fe)	%	8,55	-	0,01
Cobre (Cu)	%	0,93	-	0,01
Titânio (Ti)	%	0,18	-	0,01
Alumínio (Al)	%	0,13	-	0,01
Níquel (NI)	%	0,03		0,01
Cobalto (Co)	%	<L.D	abaixo do L.D	0,01
Zinco (Zn)	%	<L.D	abaixo do L.D	0,01
Arsênio (As)	%	<L.D	abaixo do L.D	0,01
Ouro (Au)	Mg/Kg	<L.D	abaixo do L.D	0,1
Prata (Ag)	Mg/Kg	<L.D	abaixo do L.D	0,1

Logo, conclui-se que, de acordo com as análises de caracterização acima, que o RMCS o pode ser utilizado como agregado miúdo em argamassas. E de acordo com as análises químicas de absorção atômica e comparadas com as normas NBR 10.004 (ABNT, 2004), não ofereçam risco à saúde humana e contaminação ambiental.

4.1.5 Resultados das Análises de Caracterização da Cinza Volante (CV)

4.1.5.1 Análise Granulométrica da Cinza Volante (CV)

Os resultados das análises granulométricas das CV, apresentados na Figura 4.7, mostram que de uma forma geral, as amostras de CV são bastante finas, apresentando em sua maioria partículas com diâmetro médio (D_{50}) de 28,25 μ m, o que indica que elas podem ser usadas para o preparo das argamassas. Neste caso, a CV, requerendo apenas um processo de desaglomeração simples (moagem), para ser usado nas elaborações das argamassas. Apesar de não haver um acordo quanto à forma mais eficaz de aferir a finura das cinzas volantes, é consensual que maiores finuras conduzem a maior atividade pozolânica. Como a maioria das reações químicas ocorre mais rapidamente com o aumento do teor de finos das partículas é esperado que a atividade pozolânica de uma cinza volante seja dependente da área disponível para reação.

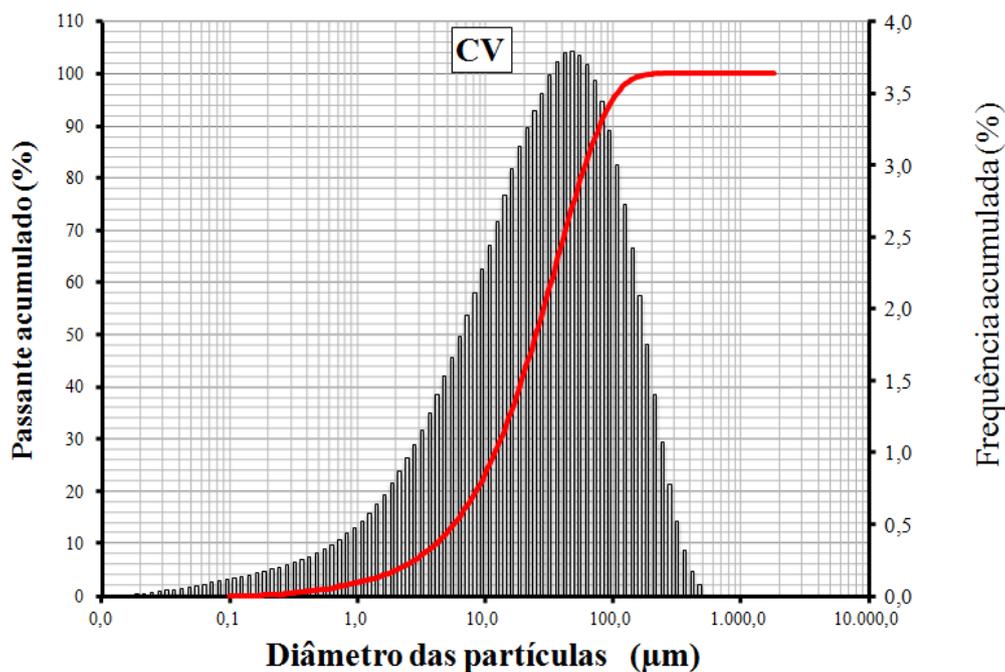


Figura 4.7 - Distribuição granulométrica da cinza volante (CV).

A Tabela 4.6 apresenta as principais análises físicas realizadas na cinza volante, como Diâmetro médio, Limites de Atterberg, Massa específica, Teor de umidade, Teor de finura.

Tabela 4.6 - Caracterização Física da cinza volante (CV).

Ensaio	Resultados	Normas técnicas
Diâmetro médio (μm)	28,25 μm	NBR 7211
Limites de Atterberg	Não plástico	NBR 6459 (ABNT, 2016); NBR 7180(ABNT 2016)
Massa específica (g/cm^3)	2,54	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Teor de umidade (%)	0,91	NBR NM 24 (ABNT,2003)

4.1.5.2 Difração de raios X da Cinza Volante (CV)

A análise da CV através da análise de DRX Figura 4.8, demonstrou a presença das seguintes fases mineralógicas Quartzo (SiO_2), Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{SiAl}_3\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$), Anidrita (CaSO_4), Calcita (CaCO_3) e Gibbsita ($\gamma\text{-(Al(OH)}_3$), estudos anteriores referente a mesmo tipo de cinza utilizada pela Hydro Alunorte observaram a presença das três primeiras fases, além de Gibbsita (ROCHA *et al.*, 2012).

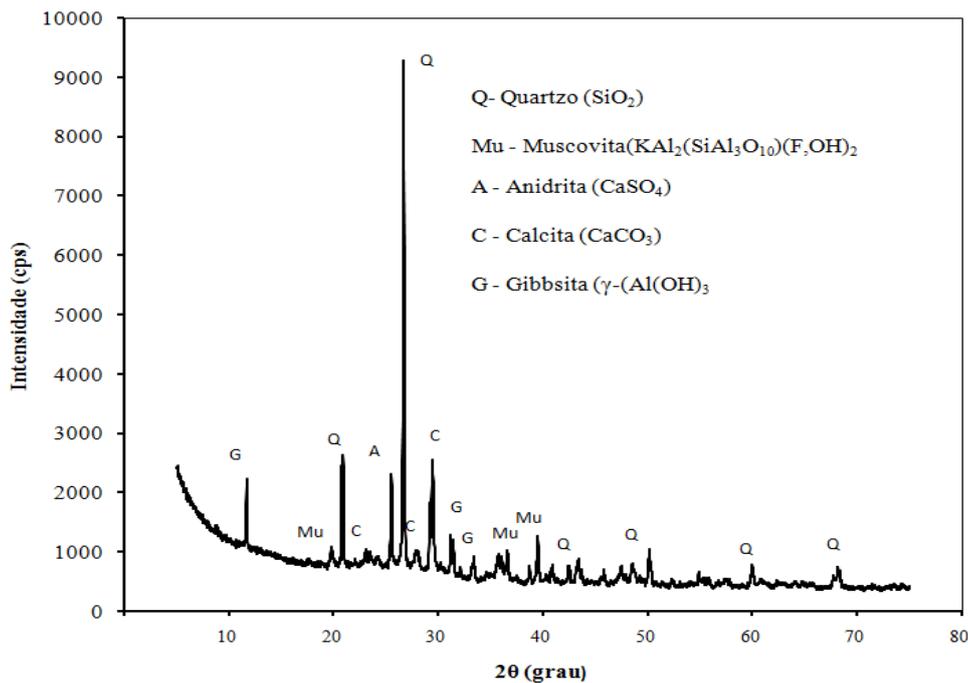


Figura 4.8 - Difratoograma de raios X da cinza volante (CV).

4.1.5.3 Espectroscopia de Fluorescência de raios X FRX da CV

Das análises de FRX das CV apresentadas na Tabela 4.7. Os resultados demonstram que 10,49 % da composição desse material é composto por Al_2O_3 , CaO (10,22%) e na sua maioria por óxido de Silício SiO_2 (38,72%), o que demonstra estar de acordo com os principais constituintes das cinzas obtidas da queima do carvão mineral (ROCHA *et al.*, 2012, Z. ZHANG *et al.*, 2014, DUAN, 2016).

Também foi observado segundo a análise de FRX, e acordo com a norma Americana ASTM C618 (*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*), a cinza volante utilizada nesse estudo está classificada como cinza volante classe C, pois a soma dos teores de sílica, alumina e óxido de ferro é inferior a 70%.

Tabela 4.7 - Análise de Fluorescência de raio - X da cinza volante (CV).

Composto	Concentração (%)
SiO ₂	38,72
Al ₂ O ₃	10,49
CaO	10,22
Cr ₂ O ₃	0,011
Fe ₂ O ₃	3,23
K ₂ O	1,12
MgO	1,63
MnO	0,04
Na ₂ O	0,58
TiO ₂	0,51
P ₂ O ₅	0,11
Tot/C	16,21
PF	16,15
Total	99,02

4.1.5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura da Cinza Volante (CV)

Das imagens obtidas através da microscopia de varredura (MEV), pode se observar que a CV possui um formato pseudoesféricos (A e C) e com formações de porções aglomeradas entre si (B e D) da Figura 4.9. Essas aglomerações são formadas devido a CV possuir uma granulometria bastante fina o que mostra que seu uso deve ser de forma racional e que em excesso pode influenciar de forma negativa na diminuição da trabalhabilidade das argamassas no estado fresco.

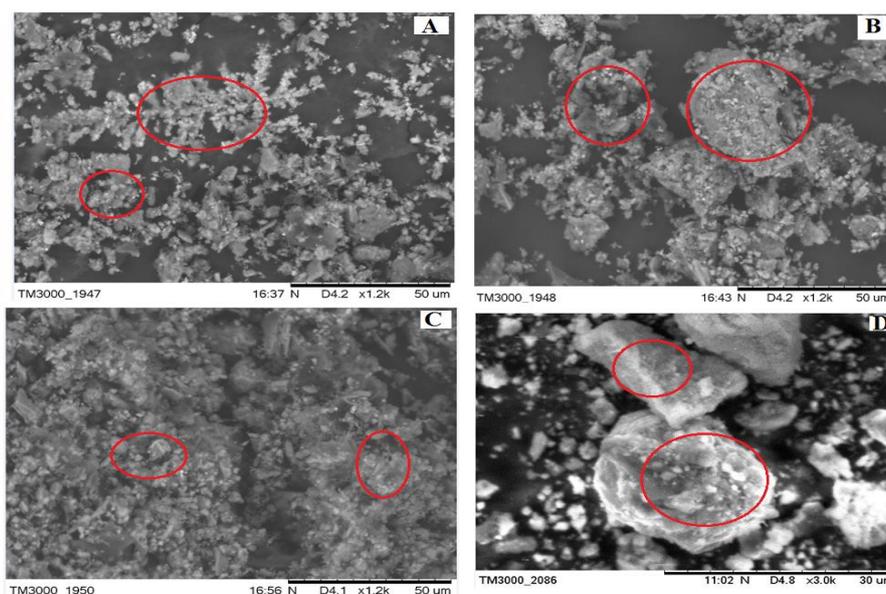


Figura 4.9 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras de cinza volante (CV).

De acordo com os resultados das análises de caracterização acima pode-se concluir que o uso de Cinza volante (CV) é viável nas confecções das argamassas, pois de acordo com a norma Americana ASTM C618 a mesma lhe dá enquadramento como cinza volante classe C, lhe conferindo atividade pozolânica.

Ressalta-se ainda que a substituição do cimento por esse rejeito na produção de argamassas pode ser efetuada com sucesso em teores de até 30% em massa, pois, o aumento no teor de cinza na mistura é proporcional à redução de resistência à compressão dos corpos de prova devido à redução nos componentes básicos do cimento, como silicatos e aluminatos de cálcio (SIQUEIRA *et al.*; 2012).

4.1.6 Características Físicas do Cimento Portland (CP 2 E-32)

A Tabela 4.8 apresenta os resultados das análises encontradas no presente estudo para o cimento do tipo CP II-E32, com suas características químicas, físicas e mecânicas, comparados com os valores fornecidos pelo fabricante Observou-se que os valores obtidos nos ensaios de caracterização atenderam aos requisitos exigidos pelas normas da NBR 11578 (ABNT, 1991), em suas características químicas, físicas e mecânicas, além de que, os resultados de resistência à compressão mostraram-se superiores aos exigidos pela norma, que, justifica a utilização do cimento CPI.

Tabela 4.8 - Resultados da caracterização química, física e Mecânica do cimento Portland CP II - E 32.

Características	Determinações	Valores Obtidos pelo fabricante	Presente estudo	Exigências da Norma NBR 11578 (ABNT,1991)
Química	Resíduo Insolúvel (%)	2,3	-	< 2,5 %
	Perda ao Fogo (%)	4,8	-	< 6,5 %
	Óxido de Magnésio - MgO (%)	3,3	-	≤ 6,5 %
	Trióxido de Enxofre - SO ₃ (%)	2,5	-	≤ 4,0%
Física	Consistência (mm)		-	-
	Finura #200 mesh (%)	0,8	7	≤ 12,0
	Finura #325 mesh (%)	6,6	-	-
	Área específica (cm ² /g)	3579	-	≥ 2600
	Início da Pega (min)	202	120	≥ 60
	Fim da Pega (min)	273	256	≤ 600
	Massa Específica (g/cm ³)	1,07		-
	Massa específica real (g/cm ³)	3,01	2,15	-
Mecânicas	Expansibilidade à quente	0	-	≤ 5,0
	Resistência à compressão (MPa)		-	-
	3 dias	19,2	15,32	≥ 10,0
	7 dias	24,3	32,06	≥ 20,0
	28 dias	33,5	44,25	≥ 32,0

4.1.7 Características Físicas e Granulométricas da Areia de Obra Civil

No processo de fabricação das argamassas a granulometria da areia foi totalmente controlada, sendo que, a maior parte da sílica (areia) utilizada neste trabalho ficou abaixo da malha 100# em peneira Tyler, uma vez que, abaixo desta malha, a areia possui morfologia esférica e alta área superficial, estando assim adequada para a conformação dos corpos de prova, bem como para propiciar melhor desempenho para ser usada em conjunto com o resíduo da construção civil (RCC).

Pelos resultados da Tabela 4.9 e Figura 4.10, observa-se que a areia (sílica) possui um d_{50} no valor de 250 μm o que equivale a 0,25 mm. Deste resultado conclui-se que de acordo com o **ANEXO 01 (composição granulométrica de solo)**, a que mesma se enquadra como agregado miúdo podendo ser utilizado nas composições das argamassas, cabe ressaltar que parte desse material foi separado na retida de 35# (0,5 mm), para a obtenção de material com características de areia média para inserção de 25% no RCC.

Tabela 4.9 - Caracterização física da areia quartzosa.

ENSAIOS	RESULTADO	NORMAS TÉCNICAS
Diâmetro médio (μm)	250	NBR 12.653 (ABNT 2014)
Limites de Atterberg	Não plástico	NBR 6459 (ABNT, 2016); NBR 7180(ABNT 2016)
Massa específica teor de umidade (g/cm^3)	1,63	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Módulo de finura	1,73	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

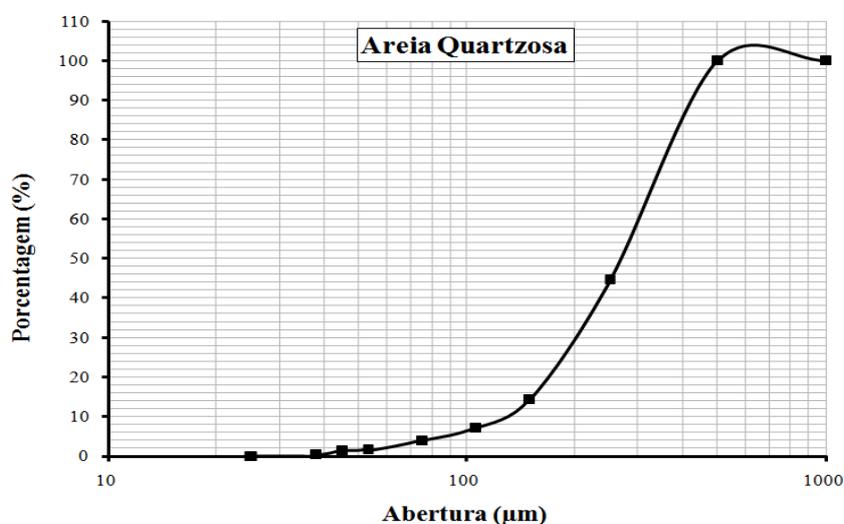


Figura 4.10 - Distribuição granulométrica da areia quartzosa.

4.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE ÁGUA NA MISTURA

4.2.1 Análise das Argamassas Produzidas com RMCS nas relações a/ag de 0,28 e 0,40

Nesta etapa foram realizados ensaios de resistência a compressão e porosidade aparente para os corpos de prova fabricados a partir do resíduo RMCS e RCC. Esses ensaios foram realizados de forma preliminar, com a finalidade de se obter um parâmetro próximo à realidade dos canteiros de obras, objetivando futuras aplicações com os aditivos poliméricos utilizados nesta pesquisa.

Analisando os resultados da Figura 4.11, verificou-se que à medida que ocorreu o aumento da relação a/ag de 0,28 para 0,40 aumentou-se a resistência à compressão para as argamassas produzidas com ambos os resíduos utilizados nesse estudo.

Analisando cada resultado em relação ao fator a/ag, verifica-se que para a relação a/ag de 0,28 considerando os 7 dias de idade os corpos de prova apresentaram valor de aproximadamente 1,42 Mpa, chegando aos 28 dias, com resistência de 1,7 MPa.

Para o fator a/ag 0,40 analisados aos 7 dias de cura, percebeu-se que os resultados tiveram uma elevação de sua resistência até os 28 dias, indo de 1,72 até 2,11MPa.

De acordo com a norma ABNT NBR 13281, essas argamassas produzidas a partir dessa relação considerando os 28 dias de cura, estão dentro da classificação de argamassas de assentamento e revestimento, visto que os resultados de resistência mecânica seguem as exigências prescritas nesta norma.

É importante ressaltar que ambas as argamassas produzidas tiveram CV nas suas constituições, o que colabora com o aumento de resistência de acordo com o aumento do teor de água, pois devido as mesmas possuírem uma quantidade significativa de sílica amorfa em conjunto com sua baixa granulométrica, sua reação química é potencializada, de acordo com a elevação do teor de água na mistura.

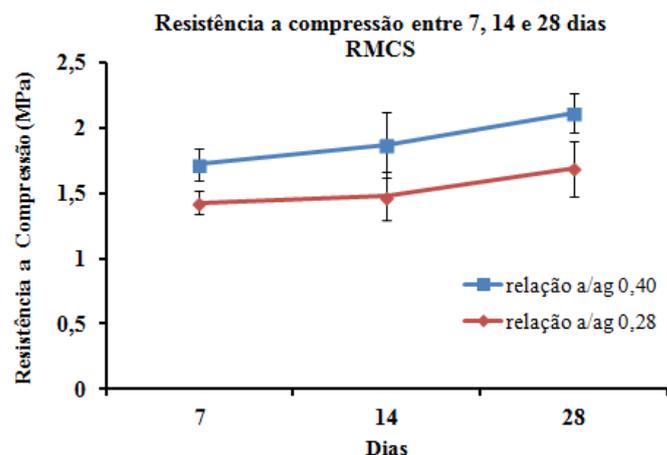


Figura 4.11 - Gráfico de resistência a Compressão das argamassas produzidas com RMCS entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40.

Na análise de porosidade aparente verificadas na Figura 4.12, observou-se o aumento dessa propriedade de acordo com o aumento da relação a/ag de 0,28 para 0,40 nos traços das argamassas analisadas, esses resultados concordam com os resultados de resistência a compressão descritos no item anterior pela relação inversa que ocorre entre a resistência a compressão e a porosidade.

Esse aumento de porosidade nos corpos de prova analisados pode estar relacionado diretamente com o teor de água quimicamente combinada, o que propicia maior espaço livre para o crescimento dos cristais de etringita que geralmente possuem uma dimensão considerada a partir do início da cura do material, no entanto quando essa água encontra-se em excesso parte desse fluido que não foi utilizado na reação de cura evapora-se fazendo que ocorra a formação de poros de dimensões micrométricas influenciando na diminuição de sua resistência.

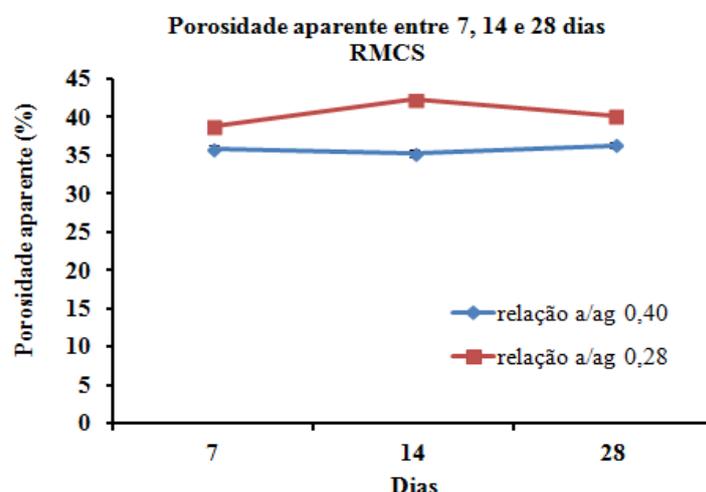


Figura 4.12 - Gráfico de porosidade aparente das argamassas produzidas com RMCS entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40.

4.2.2 Análise das Argamassas Produzidas com RCC nas Relações a/ag de 0,28 e 0,40

Para as argamassas produzidas a partir do RCC, como se observa na Figura 4.13, os resultados apresentaram à mesma relação de aumento de resistência a compressão apresentada pela argamassa produzida pelo RMCS. Porém algumas argamassas observadas no experimento consumiram uma quantidade de água total bem superior normalmente consumida por argamassas mistas, principalmente argamassas fabricadas com alto teor de fino. Este elevado consumo de água pelo sistema foi atribuído à baixa granulometria do RCC em conjunto com a CV adicionada aos traços, somando-se a areia de constituição granulométrica média utilizada como agregado miúdo.

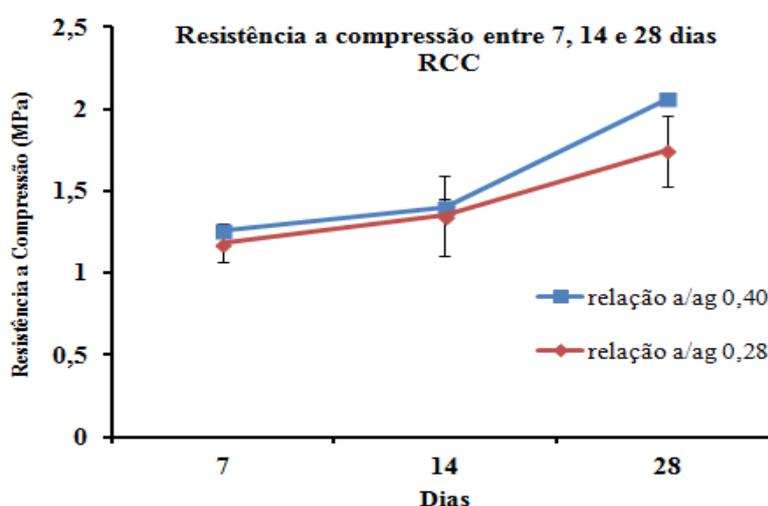


Figura 4.13 - Gráfico de resistência a compressão das argamassas produzidas com RCC entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40.

Para as argamassas produzidas a partir do RCC, a relação a/ag também apresentou uma relação de aumento de porosidade na proporção a/ag 0,40 e diminuição na relação a/ag 0,28 nos corpos de prova analisados, conferindo também uma relação inversa entre a porosidade e a resistência à compressão, como mostra a Figura 4.14.

Neste caso além da influência da granulometria dos materiais finos encontrados nos RCC's, percebeu-se durante os ensaios de mistura pequenas variações em relação ao sistema de agitação das pastas, requerendo quantidade a mais de água na mistura. Uma das possíveis explicações para esse fato é que nas argamassas recém misturadas, ocorrem a formação de filmes de água que envolvem o agregado miúdo fazendo com que a relação água/cimento nesta periferia seja superior à do restante da pasta. Isso faz

com que cristais formados tornem-se relativamente maiores que outros, o que facilita a formação de vazios tornando a estrutura com maior porosidade (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Vale ressaltar também a este efeito as pequenas variações tanto pra maior quando pra menor em termos experimentais da adição de água na mistura, tornando-se responsável pela permeabilidade do conjunto (aglomerante + agregado miúdo) em fase de endurecimento, pois o seu teor determina os espaços vazios na sequência de cura do material, após ocorrer às reações de hidratação ou a saída de água para o meio ambiente. Pastas que estão em fase intermediária de cura, o tamanho e a continuidade dos poros são o que vão controlar o coeficiente de permeabilidade das mesmas.

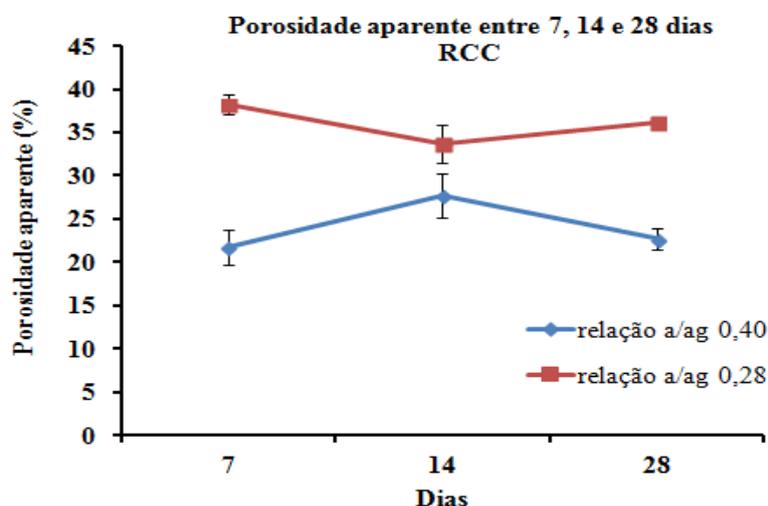


Figura 4.14 - Gráfico de porosidade das argamassas produzidas com RCC entre 7, 14 e 28 dias nas relações a/ag de 0,28 e 0,40.

4.2.3 Análise Micro Estrutural das Argamassas para os Resíduos 01 (RMCS) e resíduos 02 (RCC)

As análises microestruturais das argamassas utilizadas neste trabalho foram realizadas a partir dos 28 dias de idade. O critério de escolha dessa idade é que a hidratação da grande maioria dos grãos de cimento é parcial. Ocorre nesse tempo, o que garante um razoável número de vazios ao lado dos grãos de cimento e cristais apresentando contornos bem definidos. Também é possível a observação de fases presentes em pastas mais recentes, tais como os cristais de Etringita e C-S-H, tipo I e II.

Analisando a Figura 4.15 das argamassas fabricadas com RMCS, observou-se que para todos os traços com relação a/ag 0,28 imagem **A**, a matriz da pasta de cimento

e a interface com o agregado apresentam-se menos homogêneas, com mais poros ou com poros de menor diâmetro indicados pelas setas vermelhas, apresentando também micro fissuras indicado pelo quadrado em vermelhos sendo ampliado na imagem **B**, o que mostra que a quantidade de água na mistura não foi o suficiente para sua completa homogeneização e completa reação de polozanidade.

Já os traços com relação a/ag 0,40, apresentados na Figura 4.15 na parte C e D, mostram uma diminuição nessa quantidade de poros, o que mostra que esse teor de água na mistura apresentou-se efetiva tanto para a reação pozolânica quanto para o efeito de evaporação futura da estrutura do material. Entretanto, a figura revela uma quantidade significativa de depressões de geometria côncava em sua constituição apontados pelas setas em vermelho, provavelmente fazendo com que se tenha a impressão que ocorreu um aumento no seu índice de porosidade, assim contradizendo o ensaio de resistência à compressão, o que não foi significativo comparando com as análises de resistência do item anterior.

Segundo BOTELHO e MARCHETTI, (2010), existe uma quantidade mínima de água que possibilita à hidratação do cimento, oferecendo uma boa trabalhabilidade a mistura, essa quantidade precisa ser mantida no interior da pasta durante o processo de cura, para que seja permitido o progresso da formação da fase gel do cimento, o que torna o material final cada vez mais resistente e impermeável.

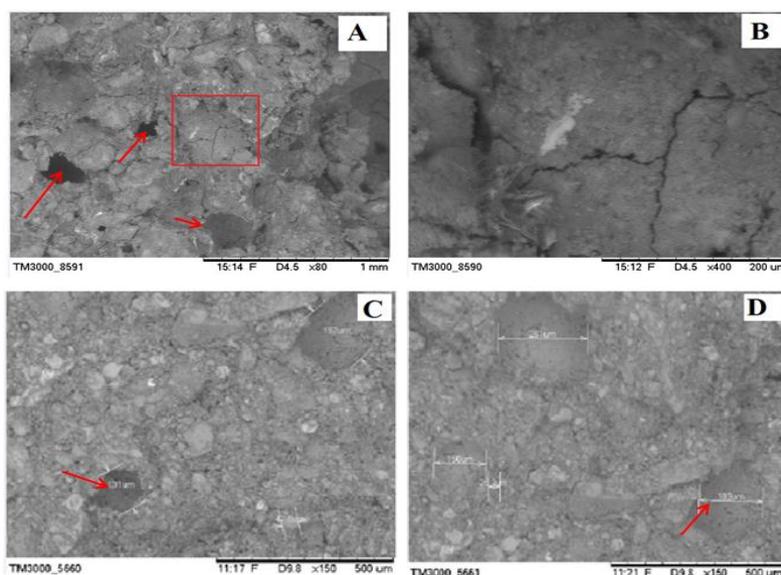


Figura 4.15 - Análise micro-estrutural das argamassas fabricadas com resíduo 01(RMCS) – A, B*, C e D**.

* A e B - relação a/ag = 0,28

Para as argamassas fabricadas a partir do segundo resíduo RCC, observou-se de acordo com a Figura 4.16 **A**, sendo ampliada em **B**, que ocorreu uma maior formação de estrutura porosa. O principal fator que explica a formação dessa estrutura, refere-se a relação a/ag , 0,28 está abaixo do valor ideal na mistura o que causou uma falta de água na matriz sendo que parte da água absorvida foi usada de forma ineficiente na reação pozolânica e o restante evaporou-se, o que causou aumento de sua porosidade.

O segundo fator apresentado na Figura 4.16 parte **C** e **D**, refere-se ao próprio resíduo 02 (RCC) em conjunto com a CV é a relação a/ag 0,40, que constituiu a mistura, pois ambos resíduos RCC e Cinza volante possuem bastantes finos em sua constituição o que facilitou o efeito filer que é caracterizado pelo preenchimento com partículas finas nos vazios existentes entre os interstícios, que compõe os agregados miúdos de dimensão superior ao cimento Portland. (AZEVEDO *et al.*,2002, KHAN, *et al.*,2017).

Neste caso o efeito filer foi significativo quando em conjunto com a relação a/ag de 0,40 facilitando a compactação do material, apresentando uma diminuição nas suas quantidades de poros.

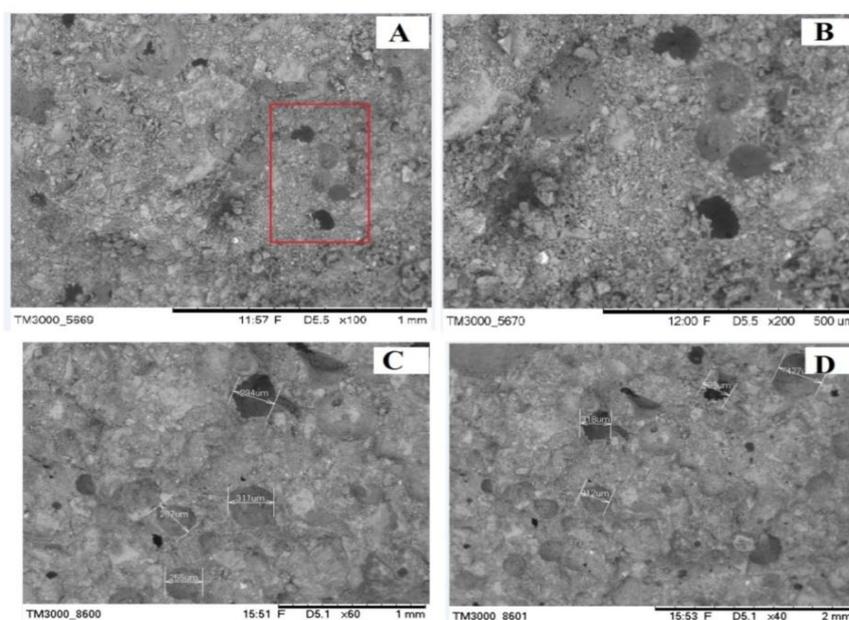


Figura 4.16 - Análise micro-estrutural da argamassa fabricada a partir do resíduo 02 (RCC) – A, B*, C e D**

** C e D - relação a/ag = 0,40

*A e B - relação a/ag = 0,28

** C e D - relação a/ag = 0,40

4.3 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS DIFERENTES COMPOSIÇÕES NAS MATRIZES DE EXPERIMENTO.

4.3.1 Resultado das Análises dos Corpos de Prova Obtidos Através da Matriz de Experimento Utilizando o RMCS e o RCC

Os resultados para as argamassas com RMCS, estão apresentados de acordo com Figura 4.17, revelam maior resistência no traço 06 apresentando 4,5 MPa, para a composição de 80% de RMCS, 10% de cimento *portland* e 10% de CV aos 28 dias de cura. Semelhantemente ocorreu para os traços 08 e 09, com valores de resistências 3,85 e 4,06 MPa respectivamente, também ensaiados no mesmo tempo de cura.

Para as argamassas fabricadas utilizando como agregado miúdo proveniente do RCC, seguiu-se os mesmos critérios para a escolha dos melhores traços a serem posteriormente dosados com polímeros.

Os resultados apresentados para as argamassas RCC, estão também apresentados na Figura 4.17, revelam maior resistência no traço 03 apresentando 4,23 MPa, para a composição de 75% RCC, 10% de cimento *portland* e 15% de CV aos 28 dias de cura

O segundo e o terceiro traço que apresentou maior resistência foi o traço 01 e traço 06, com valores de resistências 3,64 e 3,06 MPa respectivamente, também ensaiados no mesmo tempo de cura.

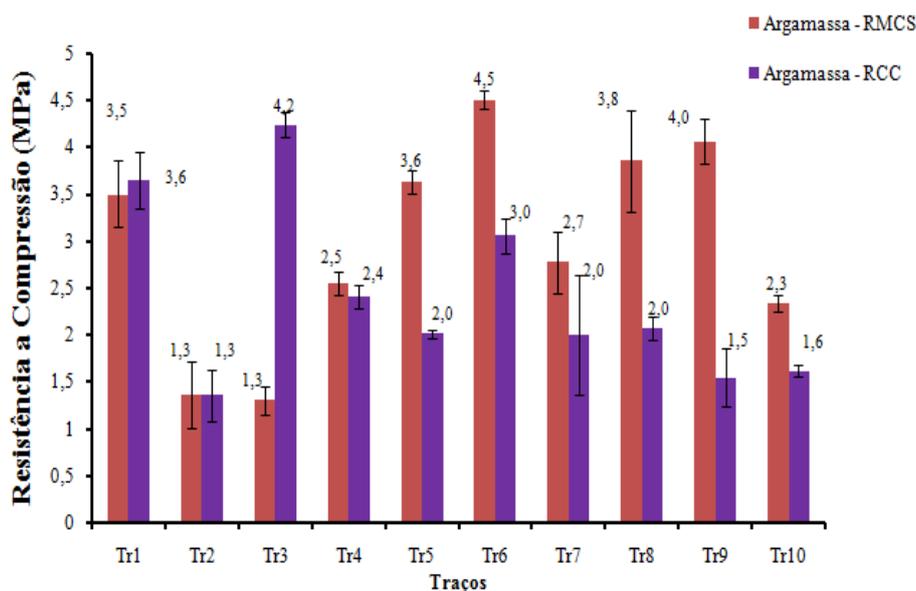


Figura 4.17 - Gráfico de resistência a compressão para as argamassas fabricadas a partir do RMCS e do RCC.

4.3.2 Porosidade Aparente das Argamassas de RMCS e RCC

Comparando a análise de porosidade aparente entre os dois tipos de argamassas confeccionadas, a partir dos dois tipos de resíduos a partir da Figura 4.18, as argamassas fabricadas com RCC apresentam maiores valores de porosidade aparente, em relação às argamassas confeccionadas com RMCS. Estes valores estão em concordância com os resultados de resistência a compressão do item anterior pois, de acordo com a literatura o valor de porosidade pode indicar menor resistência do material (YLINIEMI *et al.*, 2017).

Contudo, este maior valor de porosidade das argamassas obtidas a partir do reaproveitamento do RCC, está relacionada com as grandes quantidades de partículas finas nas composições, enquanto os traços obtidos através do RMCS apresentam uma significativa quantidade de partículas com maiores valores granulométricos.

As composições Tr 02 RCC e Tr 2 RMCS, comuns para os dois tipos de argamassas apresentaram valores de porosidade aparente diminuídos em relação aos seus anteriores e antecessores traços, pois as proporções de cimento, cinza volante e resíduos são praticamente bem aproximados.

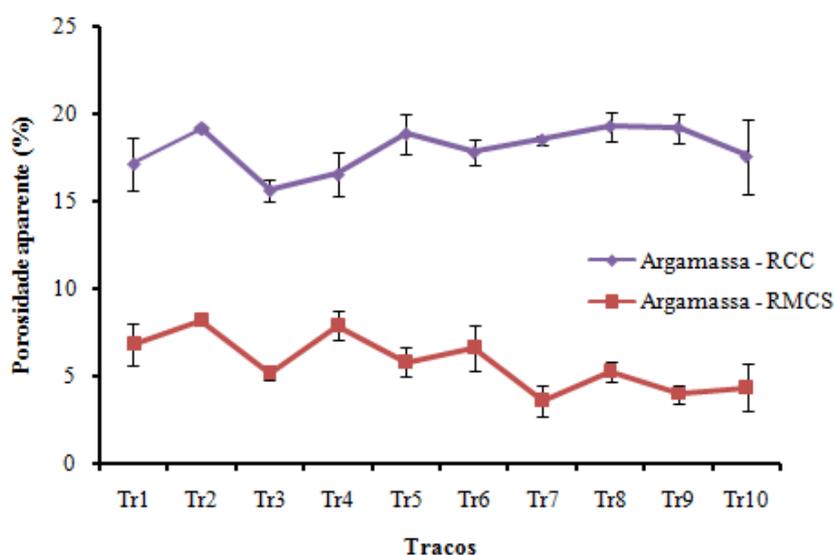


Figura 4.18 - Gráfico comparativo de porosidade aparente das argamassas fabricadas a partir do resíduo 01 e 02.

Logo, de acordo com os resultados realizados nessa etapa do experimento os traços das argamassas escolhidas segundo o critério adotado tanto para o resíduo 01

(RMCS) quanto para o resíduo 02 (RCC+ areia), ficou definido resíduo 01 (Tr 06; Tr 08 e Tr 09) para o resíduo 02 (Tr01; Tr 03; Tr 06).

4.4 EXPERIMENTOS 04 - CORPOS DE PROVA ADITIVADOS COM POLÍMEROS PVA E SBR

4.4.1 Análise Térmica

As análises térmicas das argamassas aditivadas com os polímeros orgânicos, foram realizadas após 28 dias de curas, segundo estudos de literatura 70-80% do grau de hidratação do cimento *Portland* se processa em 28 dias. (GIERGICZNY, 2006; TAYLOR, 1997).

Diferentes tipos de fatores como a variação do teor de água na mistura, a metodologia de agitação, validade do aditivo utilizado entre outros podem influenciar nos resultados das análises térmicas, recorrendo-se assim a um longo procedimento estatístico (ANTUNES, 2001).

Verificou-se de acordo com a Figura 4.19, que para os dois tipos de termogramas obtidos neste trabalho três diferentes eventos foram observados que na pasta aditivada com SBR. Observou-se maior perda de massa em relação à pasta aditivada com PVA, o que torna a argamassa aditivada com SBR menos estável em termos de aumento de temperatura em relação à argamassa aditivada com PVA que, por sua vez, apresenta uma maior estabilidade em relação ao aumento de temperatura.

Segundo OHAMA (1998), uma das causas do PVA apresentar maior estabilidade térmica quando adicionado ao cimento, e que ele possui o grupo acetato de vinila em sua composição, comprovado na análise de FTIR, que estão no **APÊNDICE E (Tabela E.1 e Figuras E.1 e E.2)**, esse grupo sofre hidrólise quando adicionado em meio alcalino esse processo de hidrólise torna o polímero mais estável em relação a variáveis que envolvem temperatura.

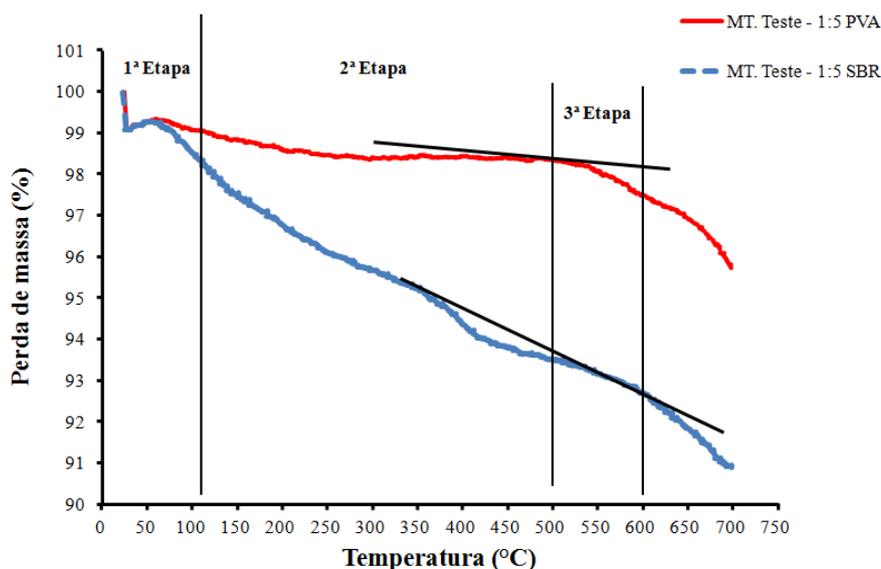


Figura 4.19 - Termogramas de análise de TG para as pastas aditivadas com PVA e SBR.

As análises das curvas de DTG também sugeriram diferenças significantes na composição das pastas, como mostra as Figuras 4.20 e Figura 4.21

Em comum para ambas as pastas, as mesmas apresentam três principais perdas de massa:

- 1) Etapa - evaporação da água fisicamente adsorvida, entre 50-75°C;
- 2) Etapa - As perdas de massa entre 250 e 350°C nas pastas poliméricas sugerem a decomposição de componentes orgânicos que constituem os diferentes grupos orgânicos que constituem ambos os polímeros, e entre 400 e 500 °C a ocorrência desidroxilação da portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ constituinte do cimento Portland.
- 3) Etapa - Decomposição das fases carbonatos (tipicamente CaCO_3), entre 500 e 650°C.

Segundo estudos de literatura, uma das causas de pastas cimentícias apresentarem menor perda de massa quando dosadas com plastificantes a base de PVA e que este polímero tem a capacidade de melhorar a cinética de hidratação, nas primeiras horas de reação, em especial quando presente em maior teor na mistura, isso deve-se a sua alta ação plastificante, reduzindo a tensão superficial da fase aquosa, favorecendo a defloculação do cimento, reduzindo a perda de massa na decomposição do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente nas matrizes cimentícias (SILVA e ROMAN, 2001 e UKRAINCZYK 2013).

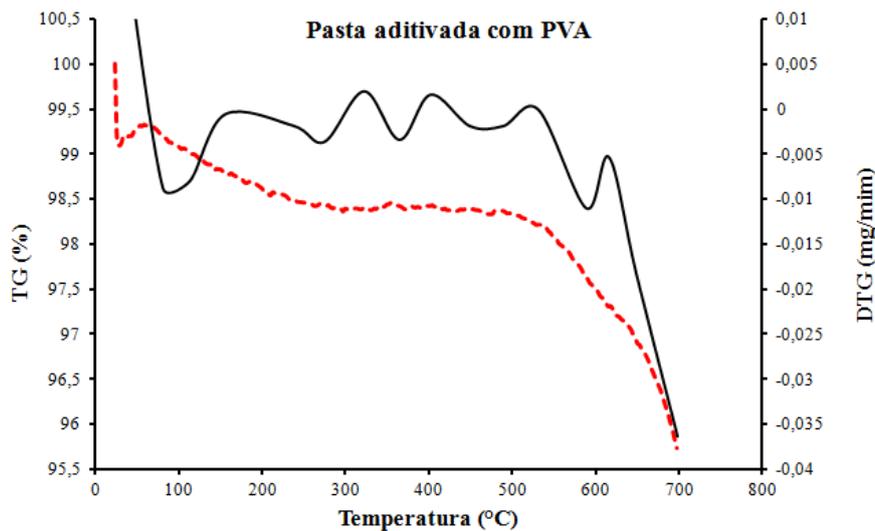


Figura 4.20 - Termograma de análise das argamassas dosadas apenas com polímero (PVA).

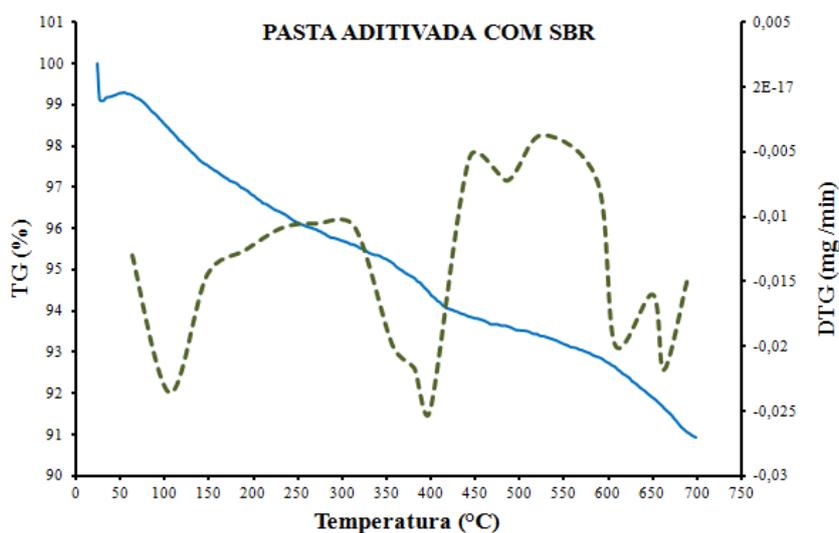


Figura 4.21 - Termograma de análise das argamassas dosadas apenas com polímero (SBR).

De uma maneira geral, os efeitos das pastas aditivadas com os polímeros PVA e SBR, foram devidos às reduções significativas do teor de hidróxido de cálcio e um aumento maior de perda de massa, mais acentuada na argamassa dopada com SBR, como comprovada nas duas curvas de TG (Figuras 4.20 e 4.21). As curvas de DSC apresentadas na Figura 4.22 mostraram maiores alargamento de efeito Exotérmico entre 350 e 450° C, para a pasta aditivada com SBR, sendo ausente na pasta aditivada com PVA.

Resultados semelhantes foram obtidos nos trabalhos de KASSELOURI *et al.*, (1995), que supôs que características de picos exotérmicos encontrados na faixa de 200 e 400°C, possa advir da decomposição do acetato de Cálcio (hemi ou di-hidratados) – $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Essa interação molecular entre o íon acetato e o cálcio, ocorre da interação entre os íons Ca^{+2} , proveniente do cimento Portland, e o íon acetato (CH_3COO^-) proveniente do polímero SBR, no instante da mistura dos agregados e água ocorre à decomposição térmica do acetato de cálcio. Este resulta na formação do carbonato de cálcio. Como mostra a Equação 4.1 e 4.2.



Ocorrendo a elevação da temperatura esta resulta num segundo evento, ocorrendo em temperatura de 520 a 550°C aproximadamente.

O segundo evento de característica exotérmica, também observado, no gráfico da Figura 4.22 ocorre em torno de 550°C, o que resulta na decomposição de carbonato de cálcio a partir do acetato de cálcio, observados em ambas as pastas. Segundo estudos de literatura esta fase acompanha uma maior instabilidade térmica. (SASAOKA *et al.*, 1998; ADÁNEZ *et al.*, 1999 e FRANTZ, 2000).

Observa-se também a ocorrência de significativas mudanças em temperaturas superiores a 650°C, mais ressaltadas nas pastas aditivadas com SBR, apresentando eventos exotérmicos, com picos entre 650 e 700°C, uma das causas pra tais eventos podem ser fatores inerentes a sensibilidade ou limitação de temperatura do equipamento. Entretanto, não foi observada nenhuma problemática quando o SBR foi usado nas misturas com diferentes tipos de resíduos dessa pesquisa.

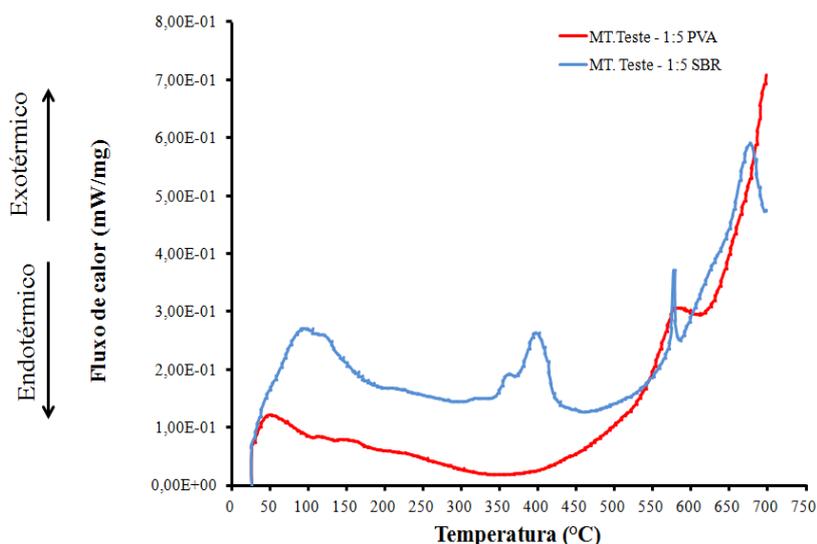


Figura 4.22 - Termograma de análise de DSC das argamassas dosadas com polímero (PVA) e (SBR).

4.4.2 Resultado das Análises dos Corpos de Prova Aditivados com Polímeros PVA e SBR Utilizando RMCS

Analisando os resultados da Figura 4.23, verificou-se que de uma maneira geral ocorreu um significativo ganho de resistência para ambos os polímeros utilizados neste trabalho. Porém os traços que tiveram o PVA em sua composição apresentaram um ganho maior de resistência, em destaque os traços Tr 06 e 09 elaborados a partir do RMCS, apresentando ganho de 45 e 55% respectivamente.

Em contrapartida esses mesmos traços (Tr 06 e 09), também apresentaram elevação de suas resistências quando aditivados com SBR, apresentando aumento de 22 e 36,4% respectivamente.

Uma importante observação feita por Silva (2001), e que quando pastas de cimento são aditivadas com polímeros orgânicos em conjunto com a condição ideal da relação a/ag na mistura. Esses materiais quando em estado endurecidos, necessitam de maiores tensões de ruptura axial para poderem se fragmentar. Quanto maior for o teor do polímero na pasta (dentro de um aspecto ótimo de inserção do produto), o que torna este filme polimérico mais resistente, garantindo em geral maior resistência a argamassa.

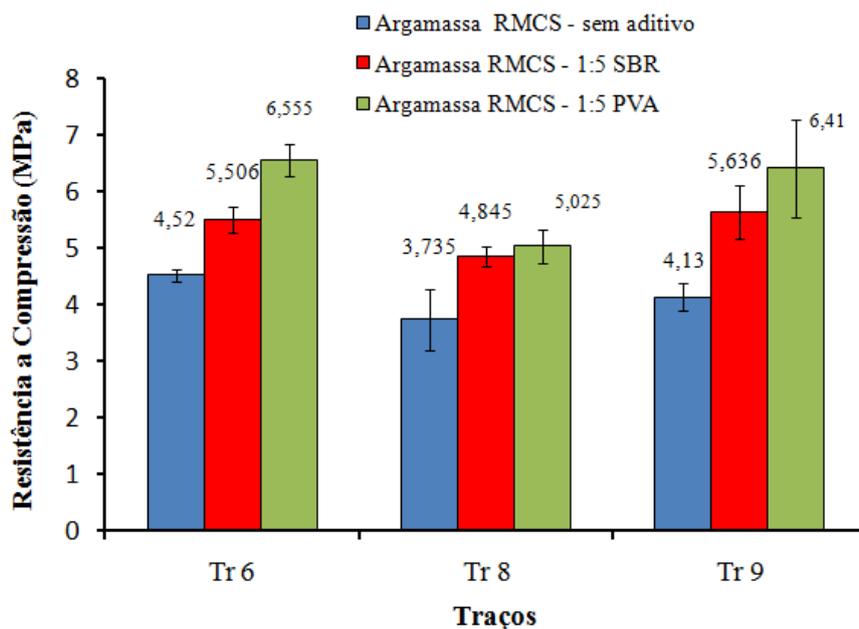


Figura 4.23 - Gráfico de resistência a compressão dos melhores traços com RMCS com e sem polímero.

Em termos de porosidade aparente observa-se a partir da Figura 4.24, que dê para as argamassas aditivadas com polímeros seus valores de porosidade aumentaram de forma significativa em relação às argamassas não aditivadas, em destaque as que tiveram o polímero SBR em sua formulação. No entanto vale ressaltar que mesmo o material tendo apresentado um aumento de sua porosidade, esse resultado não comprometeu a sua resistência, como observado no item (4.4.2) anterior.

Igual resultado foi observado por Rodrigues, (2011), que utilizou o polímero orgânico SBR em argamassa de revestimento aplicada sobre o chapisco na proporção de **1:3+SBR com cura de 28 dias**, apesar da área total de poros e da porosidade elevada das argamassas aplicadas sobre as bases tratadas com aditivo SBR o estudo apresentou menor valor de abertura das fissuras e menor quantidade de fissuras visíveis, tornando o chapisco muito resistente ao risco, sendo necessário inclusive um certo esforço físico para friccioná-lo.

Estudos de literatura apontam que uma das causas de aumento da porosidade em argamassas poliméricas é a adição de aditivos incorporadores de ar, devido a sua ação e natureza físico-química, produzirem na matriz cimentícia microbolhas que são uniformemente dispersas na mistura quando em estado fresco. É comum na maioria das argamassas aditivadas com polímeros orgânicos o aumento do teor de ar na mistura em comparação com pastas formuladas sem polímero MANSUR, *et al.*, (2008).

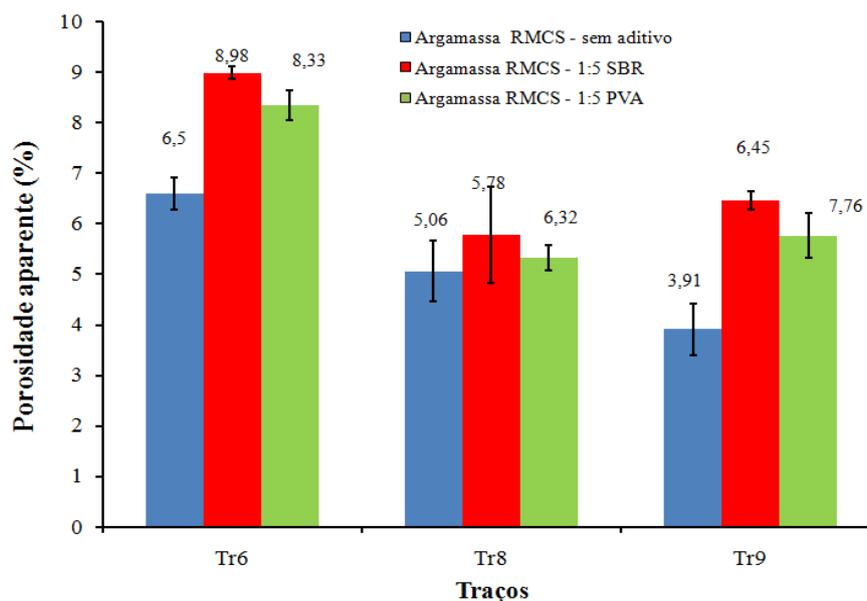


Figura 4.24 - Gráfico de porosidade aparente a compressão dos melhores traços com RMCS com e sem polímero.

A análise de absorção aparente nas argamassas poliméricas serviu como um indicador do potencial absorvente do material, sendo necessário considerar, dentre outros fatores a composição do material nas misturas e a porosidade.

Neste sentido de acordo com a Figura 4.25, observou-se que na presença do polímero SBR, a absorção de água das argamassas é maior, uma vez que o aditivo promove uma elevada incorporação de ar, e conseqüentemente, um maior número de vazios.

Já as argamassas modificadas com aditivo PVA, as quais também são incorporadores de ar, os corpos de prova elaborados com esse aditivo apresentaram valores de absorção menores, porém próximos aos corpos de prova elaborados com SBR, o que evidencia que a diferença entre absorção, não é devida apenas ao volume total de poros. Esse comportamento deve-se ao fato de haver diferenças em suas moléculas orgânicas em termos de absorverem maior ou menor quantidade de água, passando do estado sólido para gel, além de haver uma maior porosidade da argamassa na adição do polímero.

Entretanto Antunes (2005), ressalta em suas pesquisas que na prática muitos processos de mistura em escala de laboratório têm baixa eficiência comparada ao processo mecânico em canteiros de obra, sendo necessário acrescentar-se mais água ou mais aditivo incorporador de ar para aumentar a trabalhabilidade.

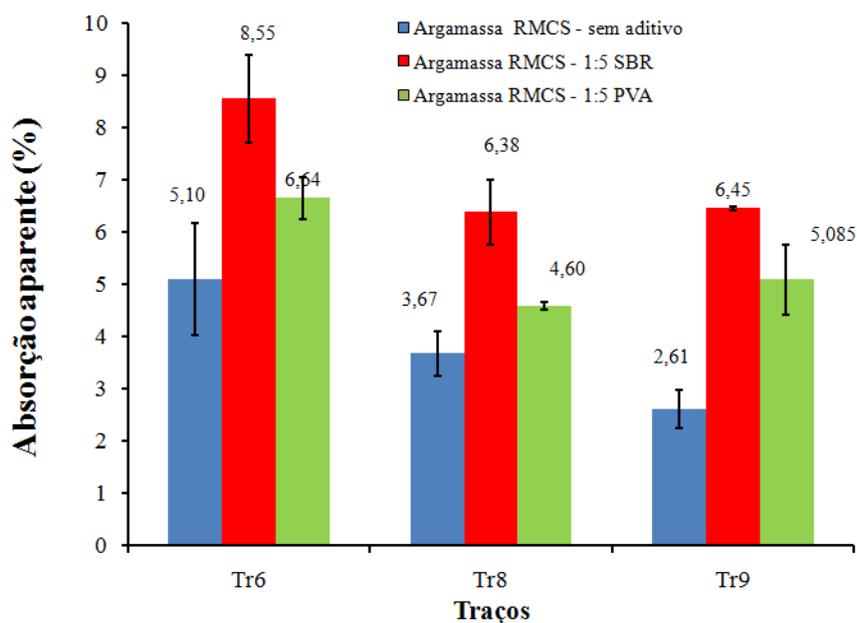


Figura 4.25 - Gráfico de absorção aparente dos melhores traços com RMCS com e sem polímero.

4.4.2.1 Resultado das Análises dos Corpos de Prova Aditivados com Polímeros PVA e SBR Utilizando RCC

Com base nos resultados obtidos no experimento anterior, nota-se que o efeito da adição dos polímeros orgânicos apresentou as mesmas características para as argamassas elaboradas com o segundo tipo de resíduo, como mostra a Figura 4.26.

Também foi verificado que os traços que apresentaram significativas resistência a compressão, foram os traços aditivados com polímero PVA, seguido pelos traços aditivados com SBR.

Na etapa do procedimento experimental observou-se que para a elaboração da mistura utilizando (RCC + areia), em conjunto com os polímeros as pastas exigiram uma maior demanda de água para atingir uma boa trabalhabilidade. Esta característica de maior consumo de água pelo sistema está de acordo com os resultados abordados no item (4.5.2) curva de trabalhabilidade, devido as características granulométricas finas do material empregado na pesquisa. Para isso, esses traços necessitaram de uma pequena correção com areia média, pois, o *filler* possui propriedades que corrigem os finos do RCC e melhoram a qualidade e durabilidade da argamassa, quando presentes em pequenas quantidades no mesmo.

Dentre as propriedades de melhor desempenho estão: a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade, a exsudação e a tendência à fissuração (NEVILLE, 1995).

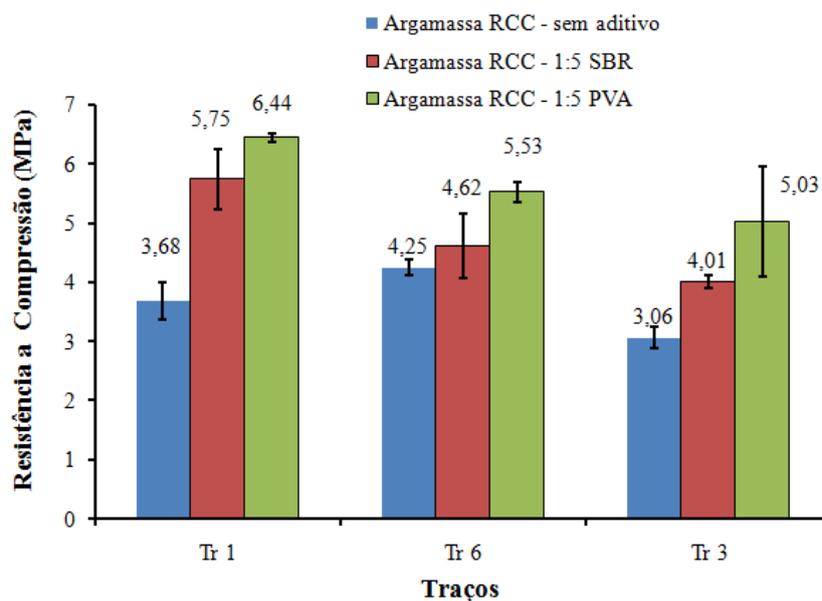


Figura 4.26 - Gráfico de resistência a compressão dos melhores traços com RCC com e sem polímero.

Na análise de porosidade aparente como mostra Figura 4.27, os resultados apresentados foram semelhantes aos verificados, nas argamassas elaboradas com o RCC, apresentando valores mais elevados para os materiais que tiveram o polímero SBR em sua formulação, entretanto o mesmo efeito não ocorreu para as argamassas aditivadas com PVA, a essa possível mudança deve-se a influência de partículas finas e médias abundantes no agregado miúdo que constitui o material (RCC+areia).

Uma possível explicação para esse fato é que a adição de polímero em materiais cimentícios promove a formação de uma película polimérica que interage na microestrutura desses materiais finos. Como no caso de microfissuras na pasta e na zona de transição, interface entre agregado/pasta. Essa película polimérica atua como uma ponte, costurando essas microfissuras, proporcionando maior resistência à compressão e flexibilidade aos materiais e posteriormente diminuindo a porosidade. (KOTOVIEZY, 2014).

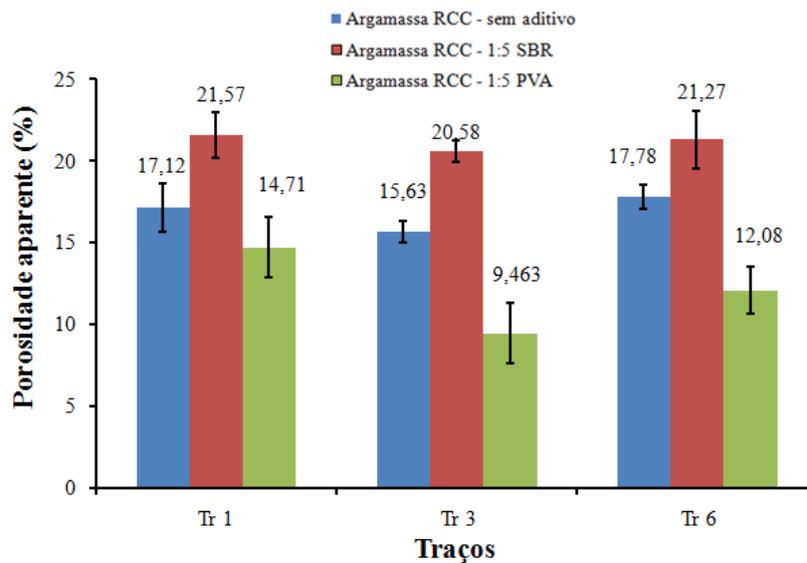


Figura 4.27 - Gráfico de porosidade aparente dos melhores traços com RCC com e sem polímero.

Na análise de absorção aparente das argamassas elaborada a partir do RCC, ainda se observa uma forte influência do polímero SBR na característica de absorção de ar, nos materiais com ele dosados, apresentando maiores valores de absorção de água, como mostra Figura 4.28.

Estudos de literatura apontam que cada tipo de matéria prima inorgânica ligada à matriz água/cimento, possui granulometria, área superficial específica, teor de álcalis, densidade, etc., que afetam de diferentes modos o efeito de incorporação de ar na mistura (RIXON e MAILVAGANAN, 1999).

Levando-se em consideração o tipo de resíduo que foi utilizado nesta etapa da pesquisa e considerando o RCC tendo sua baixa granulometria associada a CV em conjunto com o cimento, pode-se dizer que para o mesmo tipo de insumo, podem existir consideráveis variações físicas e químicas, dependentes do processo em que a argamassa é produzida.

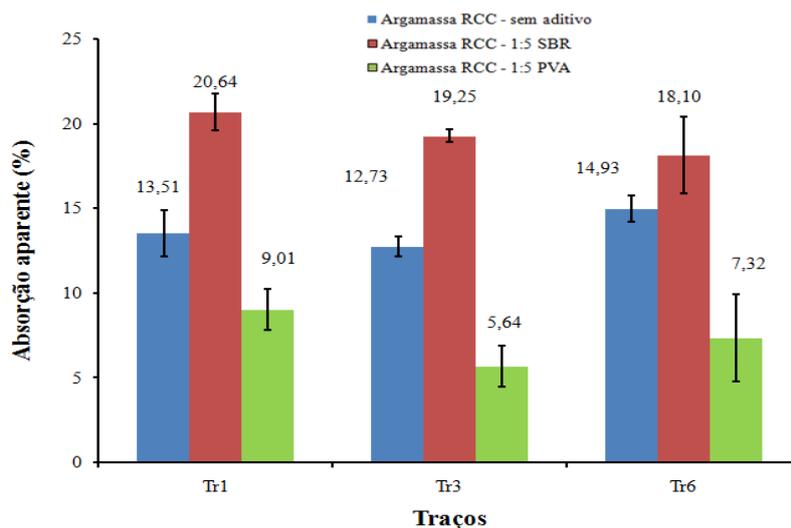


Figura 4.28 - Gráfico de absorção aparente dos melhores traços com RCC com e sem polímero.

4.4.3 Resultado das Análises Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com Polímeros PVA e SBR a Partir do RMCS

As imagens obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura possibilitaram visualizar os aspectos microestruturais das argamassas obtidas

A investigação dos fragmentos dos corpos de prova foi realizada durante a etapa de rompimento aos 28 dias de cura das argamassas, a imagem apresentada foi do traço 06 sem aditivos poliméricos. Verificou-se que, as amostras investigadas encontravam-se bastante coesas e as interfaces com os agregados estavam preservadas. Isto, provavelmente, se deve à alteração da microestrutura da zona de transição.

Na parte superior da imagem da Figura 4.29 A, circuladas em vermelho observa-se pequeninas placas sugestivas de monossulfato, embora não confirmadas por EDS devido às suas pequenas dimensões, mesmo no nível da ampliação em que foram detectadas.

Alguns grãos dessa pozolana de pequena dimensão que não reagiu na mistura, encontram-se dispersos. De acordo com TAYLOR (1997), as partículas de cinza volante, que não reagem até a idade de um ano, são constituídas de vidro silico-aluminato impuro contendo a mulita, ou de uma fase próxima à sílica pura que pode ou não conter quartzo e óxido de ferro.

Indícios de cristais aciculares de etringita foram detectados na pasta da amostra investigada (Figura 4.29 A-B, C e D), apontados pela seta em vermelho. Estes cristais

estão ora contornando os agregados, ora em locais superiores e inferiores dos mesmos. Cabe destacar que a etringita, nessa forma observada, não era esperada para a situação de referência, devido a vários motivos dentre os quais a resolução do equipamento utilizado nesta pesquisa.

Porém, o indício de formação de estrutura de ponte agudas (etringita) na argamassa mostra que o processo de cura do material está ocorrendo de forma favorável, pois os mecanismos iniciais da hidratação do cimento ocorrem pela formação de cristais em forma de agulhas, conhecidos como sulfoaluminatos de cálcio hidratado ou etringita (METHA e MONTEIRO, 2008).

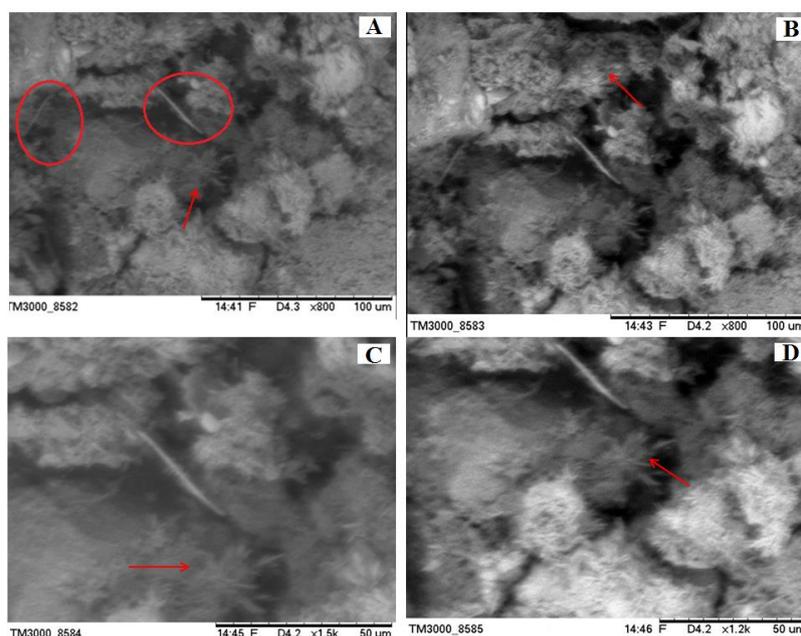


Figura 4.29 - Análise micro-estrutural da argamassado traço 06 sem aditivo – A, B, C e D diferentes pontos de cristais aciculares de etringita.

4.4.3.1 Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RMCS + PVA

Nos resultados obtidos, apresentados na Figura 4.30 -A, B e C, observou-se que, em traços aditivados com PVA, o mesmo apresentou pequenas quantidades de microfissuras no material. No entanto observa-se de acordo com a Figura 4.30-D, a existência de diversas formações de aglomerados formados em razão de o RMCS possuir uma granulometria bastante diversificada com partículas de tamanhos variados,

o que pode influenciar nas diversas análises e resultados no estado endurecido, como também no aumento ou diminuição da trabalhabilidade no estado fresco.

De acordo com estudos propostos por AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1995), pastas cimentícias quando endurecida apresenta predominantemente uma estrutura aglomerada de Silicatos de Cálcio, Aluminatos e Hidróxidos mantidos juntos por forças de Van der Waals de constituição relativamente fracas. Consequentemente, microfissuras são induzidas na pasta devido às solicitações causadas pela evaporação em excesso de água (retração por secagem).

Um outro fato observado é que o tipo de polímero (PVA) usado na mistura gerou poucas quantidades de poros como observado na superfície de fratura do material, em sua maioria, a quantidade de poros possui valores em média entre 260 a 150 μm .

Também é importante destacar de acordo com a Figura 4.30-D, que essa estrutura diferenciada de poros revela uma quantidade significativa de depressões de geometria côncava em sua constituição, provavelmente fazendo com que se tenha a impressão que ocorreu um aumento no seu índice de porosidade, assim contradizendo o ensaio de resistência à compressão.

CAMÕES *et al.*; (2002), em suas pesquisas demonstram que a resistência e a durabilidade de argamassas e concretos, estão intimamente ligadas à porosidade de sua estrutura.

Porém, se essas estruturas porosas forem preenchidas de forma parcial ou total, com polímeros, a área de apoio da carga efetiva, a qual o material é submetido, é ampliada, o que favorece o aumento de sua resistência mecânica.

Estudos de literatura apontam que existe uma quantidade mínima de água que possibilita a hidratação do cimento e uma boa trabalhabilidade, Essa quantidade precisa ser mantida no interior do material durante o processo de cura, para que seja permitido o progresso da formação de gel no cimento presente no concreto, o que o torna cada vez mais resistente e impermeável (BOTELHO e MARCHETTI, 2010).

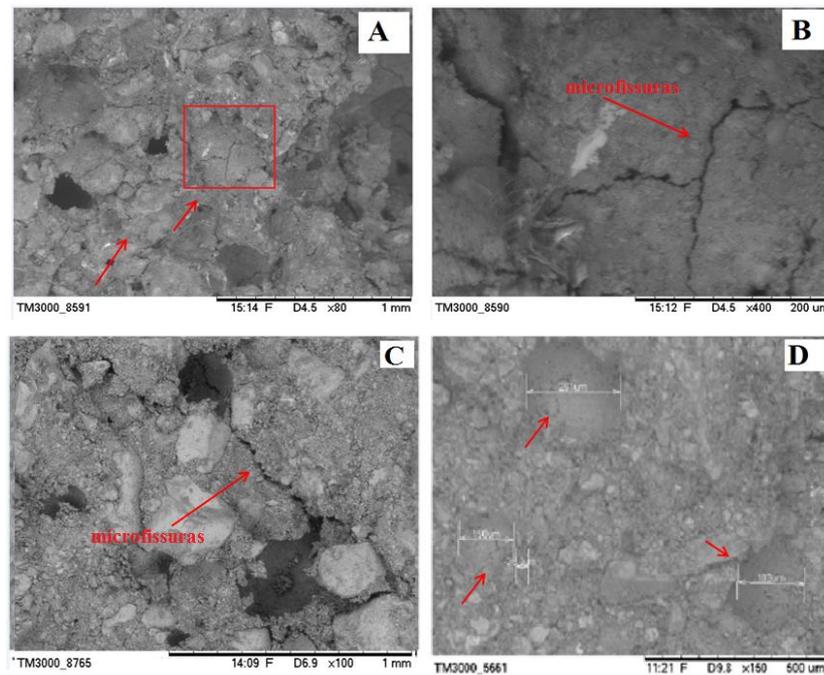


Figura 4.30 - Análise micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RMCS aditivada com PVA: (A), (B) e (C) verificação de microfissuras no material, (D) depressões de geometria côncava.

4.4.3.2 Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RCC + PVA.

Para as argamassas fabricadas a partir do RCC aditivadas com PVA, observou-se de acordo com a Figura 4.31-A, sendo ampliada na Figura 4.31-B, que ocorreu maior formação de uma zona de interfase polímero e agregado, o principal fator que explica esse fato, refere-se a reação a/ag , variando de 0,28 a 0,40 o que causou um excesso de água na matriz sendo que parte da água absorvida foi usada na reação pozolânica o restante, parte permaneceu na estrutura, causando a formação do filme polimérico e o restante evaporou-se, causando um relativo aumento de porosidade.

O segundo fator apresentado na Figura 4.31-C e D, refere-se ao próprio RCC em conjunto com a CV é a relação a/ag que constituiu a mistura, pois ambos RCC e CV possuem bastantes finos em sua constituição o que facilitou o efeito filler que é caracterizado pelo preenchimento com partículas finas nos vazios existentes entre os interstícios, que compõe os agregados miúdos de dimensão superior ao cimento Portland. (AZEVEDO *et al.*,2002 e KHAN, *et al.*,2017).

Neste caso o efeito filler foi importante, pois em conjunto com a relação a/ag de 0,28 a 0,40 para uma maior compactação do material, em conjunto com a quantidade

ideal de água na mistura ocorrendo elevação da densidade da pasta, apresentando uma diminuição nas suas quantidades de poros. Também ainda se referindo a Figura 4.31-C e D, destacados em vermelho observa-se a interfase filme polimérico e agregado. Há visualização de cristais hidratados apresentando pequenas estruturas ponte agudas bem definidos de fases presentes em pastas mais recentes, como os cristais de Etringita e C-S-H, tipo I e II

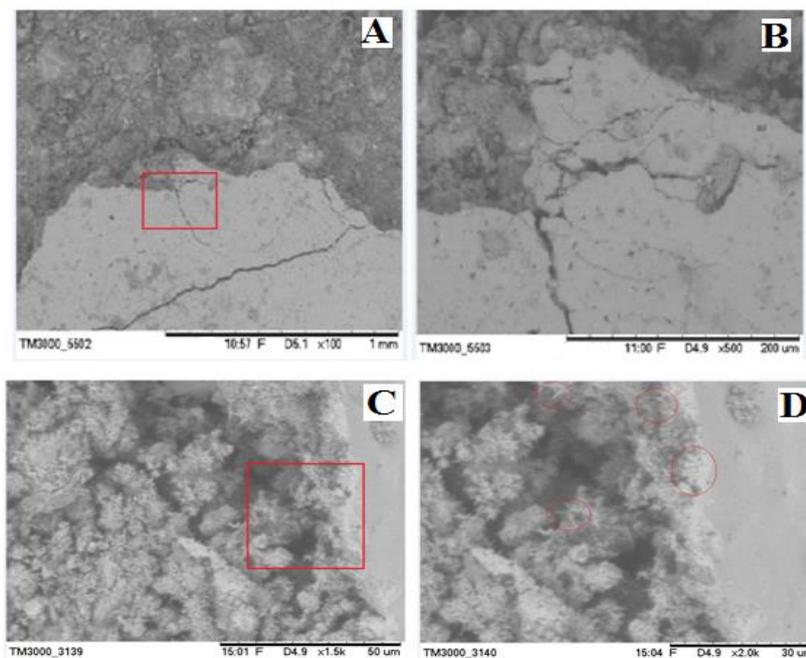


Figura 4.31 - Análise micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RCC aditivada com PVA: (A), (B) formação de uma zona de interfase polímero e agregado, (C), (D) interfase filme polimérico e agregado.

4.4.3.3 Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RMCS + SBR

Para a argamassa fabricada a partir do RMCS, as imagens mostram que, apesar da argamassa ter as mesmas proporções das argamassas aditivadas com PVA, o aditivo SBR provocou alterações na estrutura desta. Na parte A da Figura 4.32, duas fases foram observadas de grande importância: agregado, matriz da pasta de cimento e uma interface bem definida entre estas, denominada interface pasta/agregado ou Zona de transição.

Na parte B da Figura 4.32 mesma Figura, ressalta-se especialmente, o fato da argamassa, apresentar poros maiores, porém, também uma quantidade expressiva de

poros de pequenos diâmetros e pseudo poros de geometria côncava, corroborando com que diz a literatura, a respeito deste efeito do polímero na porosidade de pastas e argamassas, conforme explanado anteriormente. Outro efeito destacado na parte C e D da Figura 4.32, é o efeito de ancoragem química. Esse efeito mostra que a película formada pelo polímero SBR, concentra-se no sistema de aglomerados de grão da argamassa endurecida.

Utilizando análise de microscopia eletrônica em argamassas poliméricas Silva e Roman (2001), demonstraram que os produtos da reação química de hidratação do cimento são envolvidos pela película, que se forma também em locais onde há maior concentração de água, como na interface pasta-agregado. O resultado é que a fase microestrutural da argamassa apresenta uma baixa permeabilidade devido a formação dessa película sobre as fases cimentícias o qual preenche os poros e vazios parcialmente ou totalmente.

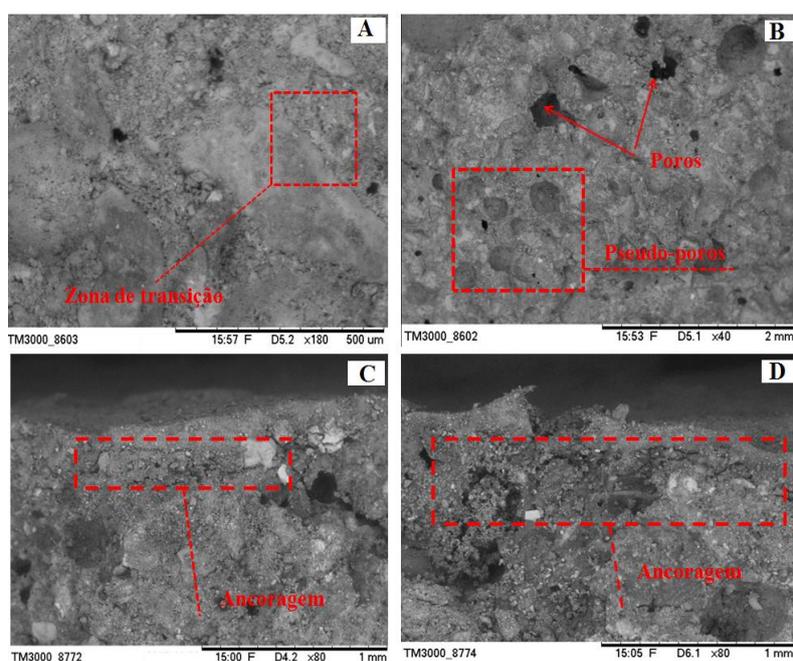


Figura 4.32 - Análise Micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RMCS aditivada com (SBR)- (A) Interfase agregado matriz, (B) Quantidade expressiva de poros de pequenos diâmetros e pseudo poros, (C) e (D) Efeito da ancoragem química.

4.4.3.4 Resultado da Análise Micro Estrutural das Argamassas Aditivadas com RCC + SBR

De acordo com a micrografia da amostra representativa, da Figura 4.33, observa-se a formação de uma película, que se entrelaça nos grãos de cimento e grão de

agregado miúdo (RCC + areia) constituintes da argamassa, o que mantém os componentes da argamassa mais compactos, isso faz que ocorram interconexões de características elásticas preenchendo ou reforçando, as cavidades internas do material bem como seus poros capilares.

Com isso observou nos ensaios de resistência a compressão que apesar do material apresentar uma considerada porosidade não ocorreu diminuição de sua resistência mecânica. Pode-se se concluir que a película formada pelo polímero proporcionou uma ação de apoio à estrutura do material para transmissão de forças, ocasionando o efeito de diminuição da propagação de microfissuras e aumentando a resistência mecânica.

Nos trabalhos de AFRIDI *et al.*, (2003) foi observado o mesmo efeito no desenvolvimento da película polimérica por coalescência dos polímeros, utilizando pós redispersíveis utilizando a mesma técnica de imagens MEV em argamassas modificadas com VAE, às quais concluiu que as películas poliméricas formadas apresentavam estrutura densa e superfície lisa, melhorando a resistência de aderência das argamassas estudadas pelos autores.

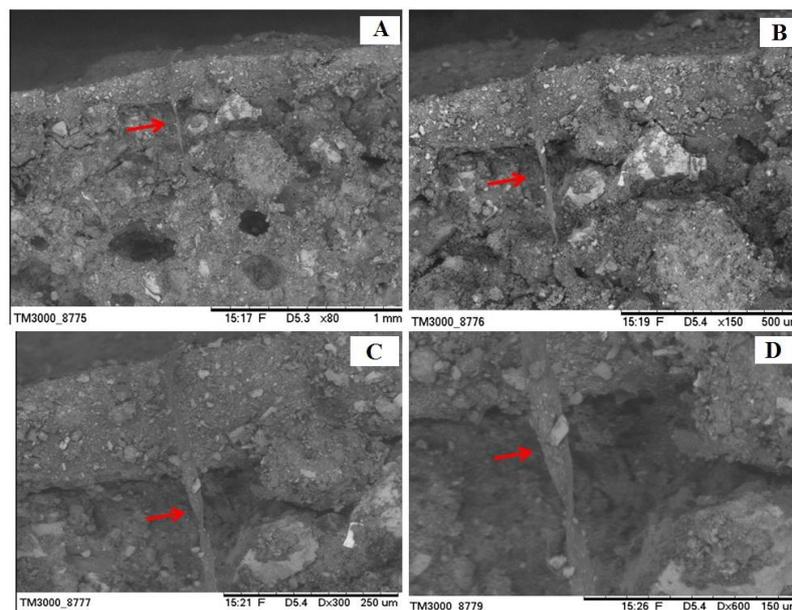


Figura 4.33 - Análise micro estrutural da argamassa fabricada a partir do RCC aditivadas com SBR: (A), (B), (C) e (D) Evolução no aumento da imagem da película polimérica formada na interfase agregado cimento.

4.5 ANÁLISES REOLÓGICAS

Avaliar as propriedades reológicas em operações que envolvem materiais cimentícios são de extrema importância. Isso porque esse material deve ser fluído o suficiente, para ser bombeado através da tubulação de revestimento e assim preencher sem falhas os espaços anulares em reforma ou construção de dutos cerâmicos, bem como revestimento de superfícies internas e externas (TAYLOR, 1997 e NELSON, 2006).

4.5.1 Influência do Teor de Agregados nas Misturas Água Cimento

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.34, as misturas apresentaram significativas distinções em relação aos três tipos de resíduos utilizados na pesquisa. Em comum, verificou-se que com o aumento dos teores dos agregados aumentou-se de forma não linear a viscosidade aparente de cada traço, isto é, devido à elevação do grau de fricção e colisão das partículas provenientes dos resíduos sólidos que compõem os diferentes tipos de mistura.

Como observado para o resíduo com maior valor de fração granulométrica no caso o RMCS, o mesmo apresentou maior valor de viscosidade aparente seguido pelo RCC e posteriormente a CV que apresentou menor valor de d_{50} .

Para uma dada fração volumétrica, quanto maiores os valores de tamanho dos agregados maior o valor de colisões das partículas que afetam o escoamento das argamassas. Um outro fator é a ocorrência do efeito físico filler que é característico de misturas que possuem quantidades significativas de finos, fazendo com que ocorra uma maior absorção de água pelo sistema, aumentando o atrito interno das partículas proporcionando a diminuição da plasticidade e aumentando sua consistência, trazendo como consequência a diminuição de sua trabalhabilidade (BANFILL *et al.*, 2009 e HOTZA, 2010).

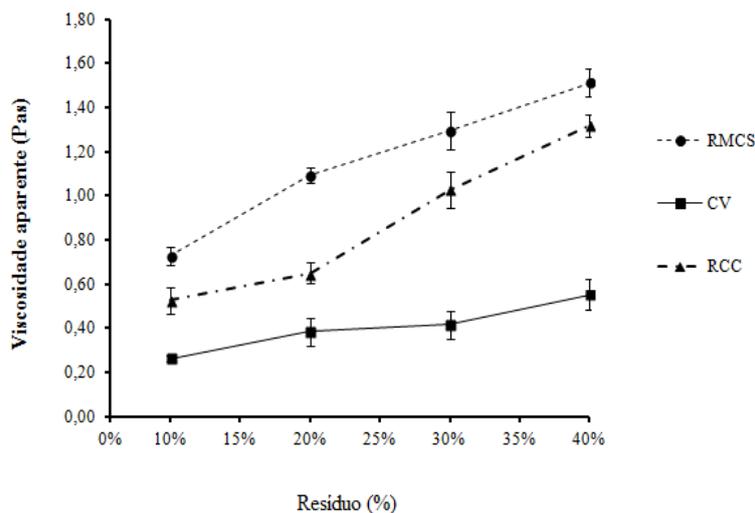


Figura 4.34 - Influência do teor de resíduos nas viscosidades das pastas.

4.5.2 Curva de Trabalhabilidade

De acordo com o gráfico da Figura 4.35, de uma forma geral, como esperado, ocorreu aumento do torque com o passar do tempo devido à hidratação do cimento e com isso ocorre uma menor quantidade de água livre na fluidificação da mistura. No entanto esse comportamento torna-se mais significativo, conforme o aumento do tempo e inserção do RMCS e do RCC em conjunto com a CV nos traços posteriores, o que pode ser uma característica de sua pozolanidade conferindo atividade cimentante, como observado em cada uma das curvas. Os resultados mostraram boa concordância com os trabalhos de SENFF *et al.*, (2011), que utilizou lama vermelha em substituição ao cimento *portland*.

Observou-se também que para as argamassas fabricadas com resíduo 01 (RMCS), o ensaio de avaliação do torque foi mais prolongado em relação à pasta confeccionada com RCC. A explicação é a ocorrência do efeito físico filler que é característico em misturas que possuem quantidades significativas de finos como apresentado no gráfico de apoio de dispersão granulométrica, apresentando na Figura 4.35 com partículas de menor diâmetro que o RMCS, fazendo que ocorra uma maior absorção de água pelo sistema composto pelo resíduo RCC. Com isso, aumenta assim o atrito interno das partículas proporcionando a diminuição da plasticidade e aumentando sua consistência, trazendo como consequência a diminuição de sua trabalhabilidade (BANFILL *et al.*, (2009) e SENFF e HOTZA., (2010).

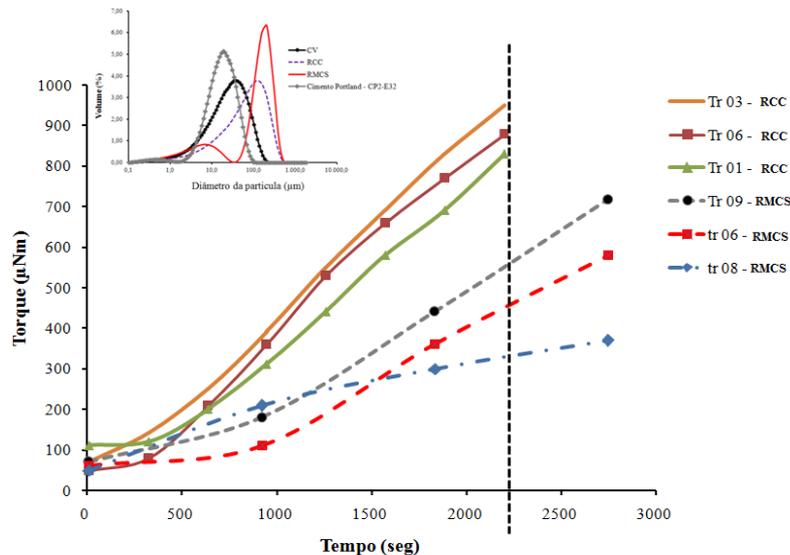


Figura 4.35 - Curva de Trabalhabilidade para os melhores traços do 2º experimento.

4.5.3 Influência da Inserção de Aditivos Orgânicos PVA e SBR na Energia de Agregação (histereses reológicas) das Pastas Elaboradas a Partir do RMCS e RCC

Nessa etapa da pesquisa avaliou-se a energia envolvida no processo de misturas das argamassas, através da área obtida através da histerese reológica que é formada por ciclos ascendentes e descendentes em função da tensão vs. taxa de cisalhamento. (PILEGGI; STUDART; PANDOLFELLI, 2001, CARDOSO, 2015).

Comparando os resultados obtidos da Figura 4.36 e Figura 4.37, pode-se observar para as argamassas não aditivadas, que maior energia de quebra apresentou a argamassa fabricada a partir do RCC.

Esse aumento de energia de acordo com estudos de literatura ocorreu devido o resíduo (RCC), apresentar uma quantidade significativa de finos, ocorre que no momento em que o líquido é adicionado no sistema, um efeito de formação de aglomerados, uma vez que ele é responsável pela união de várias partículas finas por forças de adesão, aumentando a energia para a quebra dos mesmos na mistura (YAMMINE *et al.* 2008).

Desse modo, durante os ciclos o material apresentou maior resistência ao cisalhamento imposto e um comportamento menos fluido em relação à argamassa produzida com RMCS, este resultado está em concordância, com os resultados obtidos na curva de trabalhabilidade do item 4.5.2. da Figura 4.35.

Por fim as argamassas aditivadas com polímero PVA e SBR, nota-se que, em geral, há uma queda nos valores deste parâmetro, para todas as pastas com diferentes teores de SBR em sua composição, tanto as elaboradas a partir do RMCS, quanto resíduo RCC. As mesmas apresentaram uma menor área de histerese em relação aos traços sem aditivo e com aditivo PVA. Esse resultado em relação ao SBR pode estar associado à estrutura química do polímero em promover melhor lubrificação das partículas e possibilitar a homogeneização da suspensão, e por conferir forças de ação repulsivas entre as partículas, reduzindo ou eliminando a adesão entre elas, ocasionando melhor trabalhabilidade e menos desgaste na aplicação desse material ao seu substrato.

Porém, é importante destacar de acordo com estudos de literatura que o aumento na quantidade de polímero pode permitir a diminuição na quantidade de água necessária para manter a viscosidade do material, o que pode ocasionar desestabilidade na reologia do material. (OHAMA, 1998; BARLUENGA e HERNÁNDEZ-OLIVARES, 2004; UKRAINCZYK, 2015).

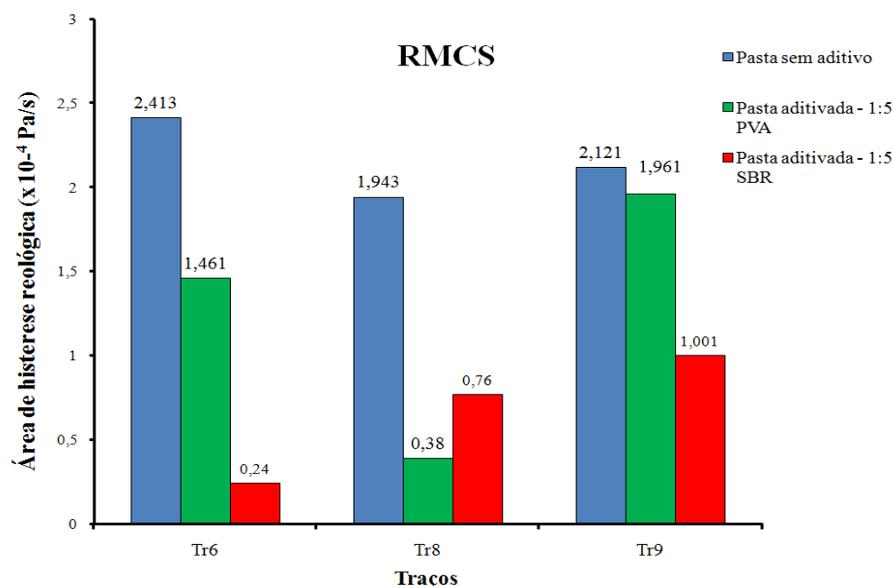


Figura 4.36 - Gráfico de área de histerese reológica para os melhores traços de argamassas confeccionadas a partir do RMCS com e sem Polímero.

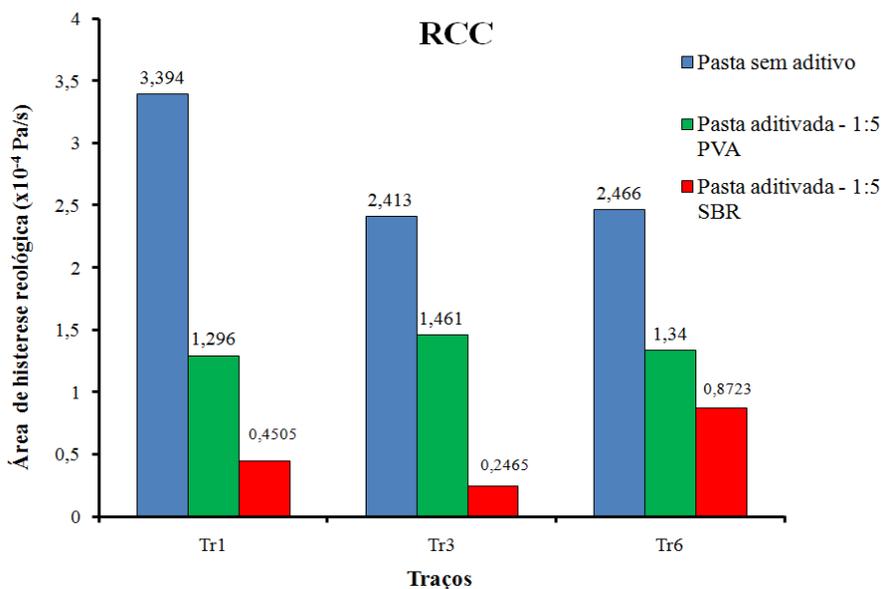


Figura 4.37 - Gráfico de área de histerese reológica para os melhores traços de argamassas confeccionadas a partir do RCC com e sem polímero.

4.5.4 Curvas de Fluxos Reológicas

O efeito da adição dos aditivos poliméricos na reologia das argamassas é observado através das curvas de fluxo apresentadas neste item do presente trabalho. A sequência de análises apresentará o perfil reológico das pastas formuladas, através das misturas de cimento como aglomerante e RMCS e RCC como agregado miúdo, variando os teores de PVA e SBR em 1:5.

4.5.4.1 Curvas de Fluxo Reológicas das Argamassas Confeccionada com RMCS

Em relação às argamassas elaboradas a partir do RMCS, que não foram aditivadas, como mostra a Figura 4.38, verifica-se a existência de pequenos ruídos de medição no perfil das curvas de crescimento e decrescimento da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento aplicada, entretanto, não foram observadas mudanças bruscas nas medições que pudessem interferir no comportamento reológico total das misturas analisada.

É comum em ensaios reológicos de materiais particulados, que utilizem viscosímetros rotacionais, serem observados estes tipos de fenômeno (ruído), que dentre as principais causas, deve-se, a granulométrica do material sólido inserido na mistura, o tamanho e a forma das partículas de agregado, concentração de sólidos, composição

química, além do controle dos parâmetros de taxa e tempo de cisalhamento e fatores internos e externos como o “efeito de parede”, que ocorre entre a interface do rotor e da suspensão cisalhada. (DEWAR e JOYCE, 2006; MOURA JÚNIOR, 2006; FERREIRA *et al.*, 2005 e BANFILL SAUDERS, 1981,).

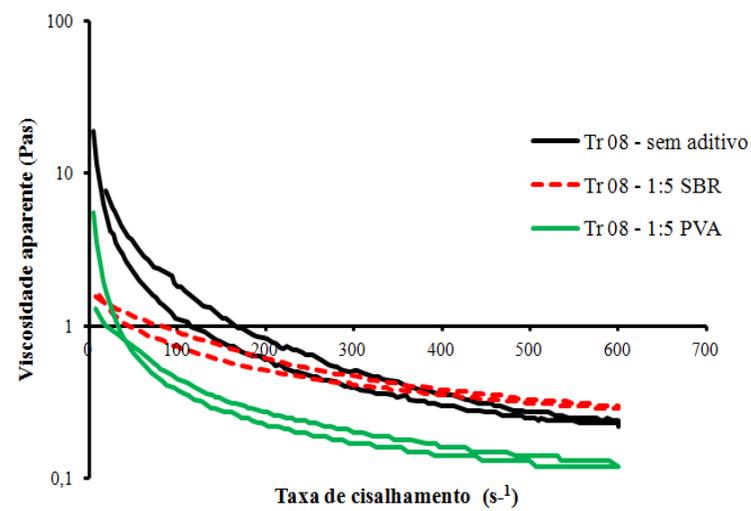
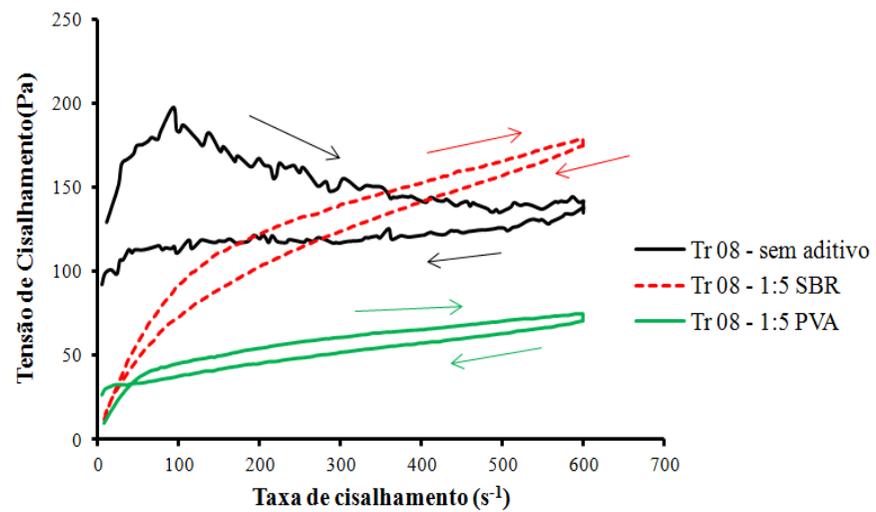
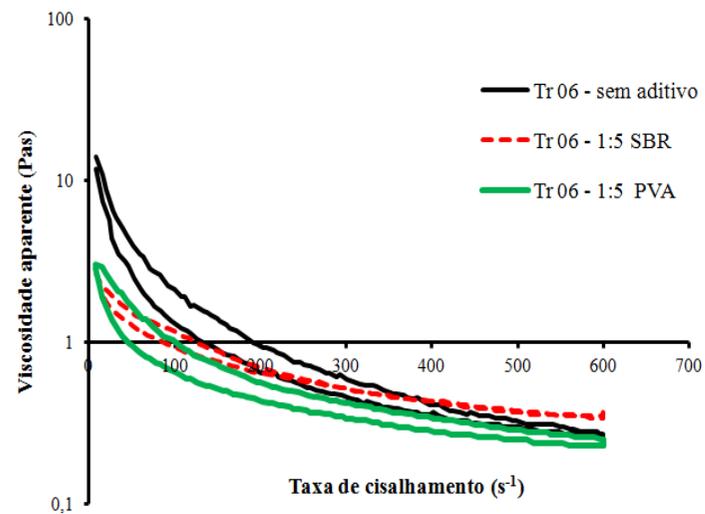
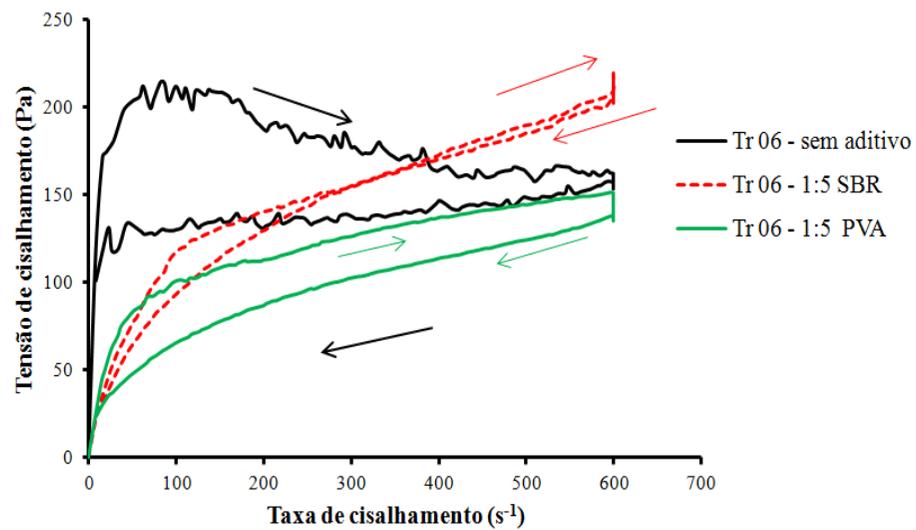
Em relação aos dois tipos de polímeros utilizados verificou-se que quanto maior o teor de SBR, isto é tanto para as formulações que utilizaram o RMCS quanto o RCC, maiores foram as relação de tensão versus taxa de cisalhamento e viscosidade aparente versus taxa, apresentando com isso menor fluidez, porém baixa energia de desagregação, isto é menor tixotropia, trazendo melhoria em sua aplicação e pouco desperdício em relação à ruptura por tração no estado fresco, confirmando os resultados do item (análise tixotrópica).

Ainda destacando os resultados de área de histerese reológica (área formada entre as curvas de aceleração e desaceleração) e o modelo reológico de cada mistura observa-se que para todas as argamassas analisadas neste trabalho, apresentaram a característica de pseudoplasticidade com tensão inicial de escoamento, apresentando área de histerese distinta em níveis de tixotropia.

Porém para as misturas aditivadas com os polímeros orgânicos, principalmente para as que tiveram em suas constituições o SBR, como reportado anteriormente, a relação tensão e taxa de cisalhamento foi crescente com o passar do tempo, apresentando diminuição de sua área de histerese reológica e aumento da viscosidade.

Para o polímero PVA aplicado a essa mistura, verifica-se uma característica semelhante entre tensão e taxa de cisalhamento e viscosidade, em relação às pastas aditivadas com SBR, porém com menores inclinações da curva tensão versus taxa e menor viscosidade.

RMCS



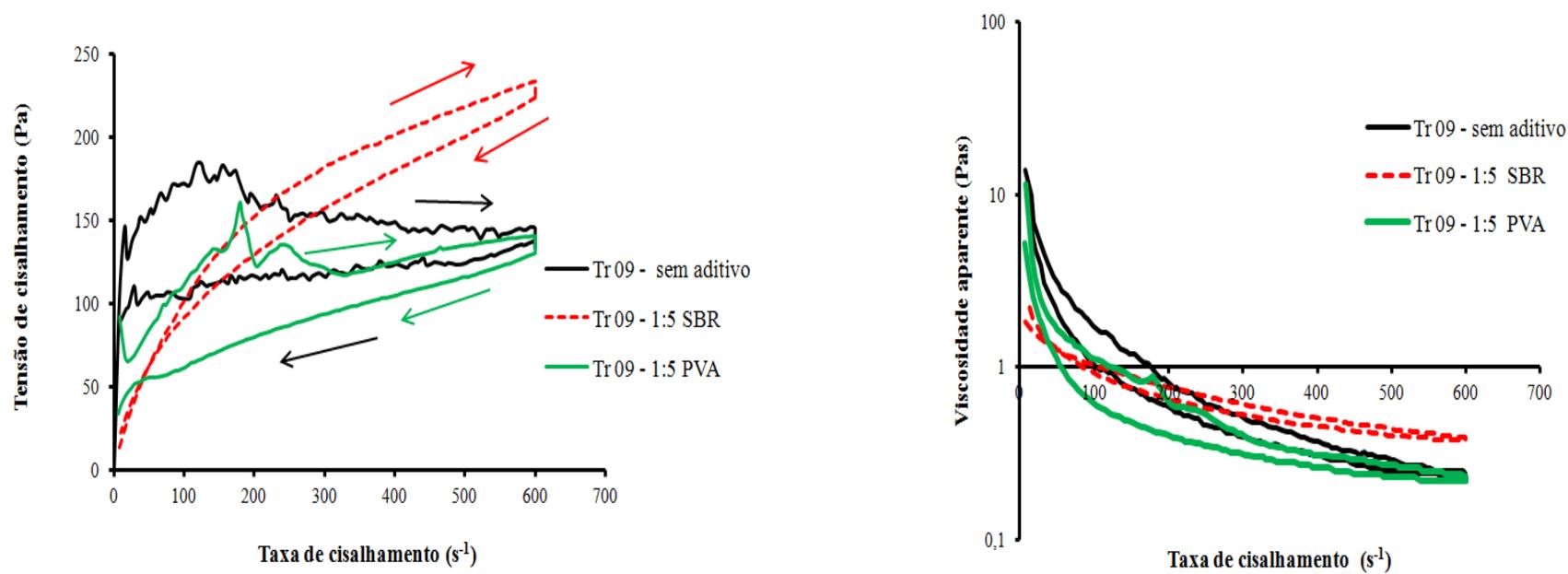


Figura 4.38 - Curvas de fluxo para os traços 06, 08 e 09 fabricados a partir do RMCS em comparação com adição e sem adição de polímero.

4.5.5 Curvas de Fluxo Reológicas das Argamassas Confeccionada com RCC

Para as pastas não aditivadas, nota-se que o perfil reológico obtido está de acordo com a maior dificuldade na trabalhabilidade observada anteriormente nos resultados das curvas de trabalhabilidade verificadas no item (4.5.2) da Figura 4.35, ou seja, de um modo geral quanto maior foi o teor de resíduo, maior foi a queda na trabalhabilidade das argamassas, como observado na semelhança das curvas dos traços (Tr 01, Tr 03 e Tr 06) como mostra a Figura 4.39, essa semelhança das curvas mostra que a movimentação do grãos provocaram um maior atrito entre elas fazendo com que não se movimentassem com a mesma facilidade que as argamassas com maior fluidez.

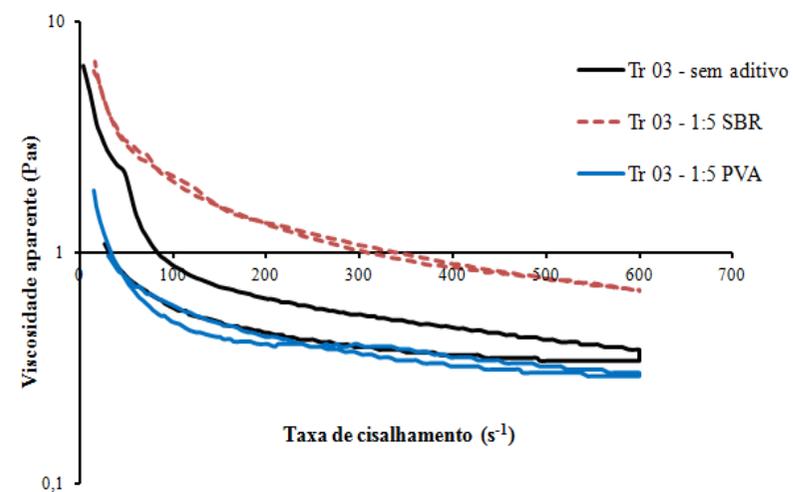
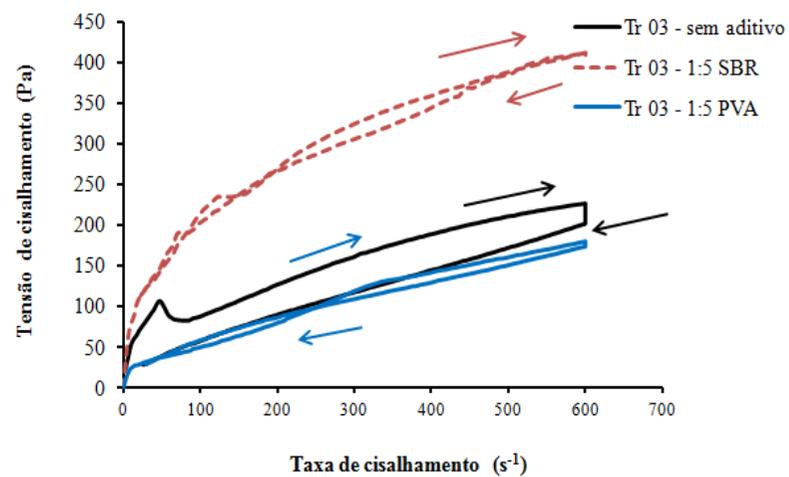
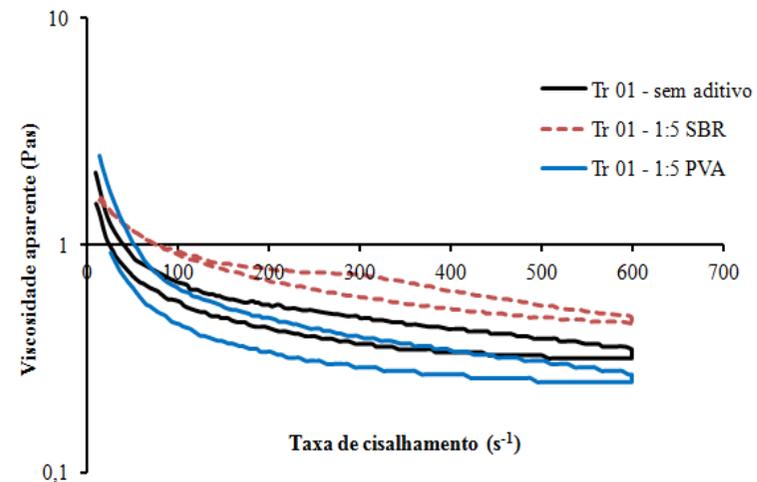
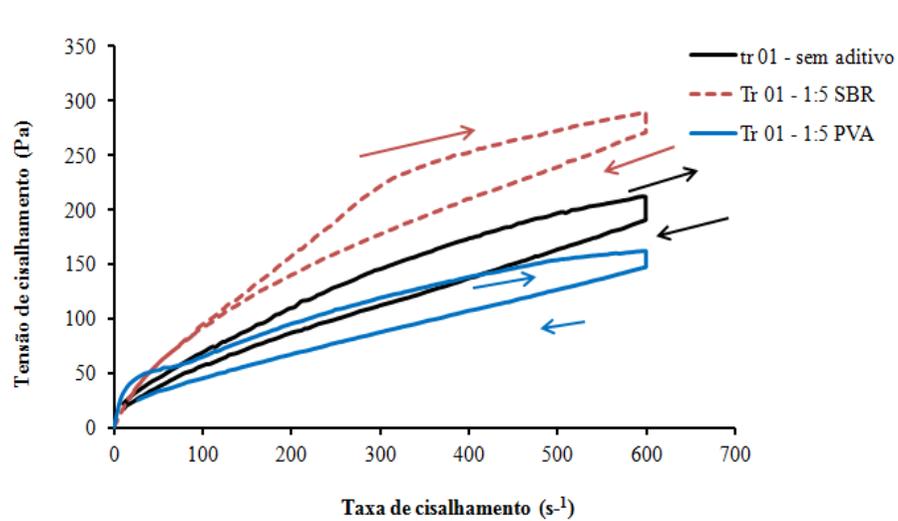
Para os traços aditivados com polímeros plastificantes, nota-se que a área de histerese é fortemente reduzida logo ao longo dos 180 segundos de ensaio, permitindo confirmar a facilidade na destruição estrutural dos agregados durante o decorrer do teste.

Observou-se também a nítida a formação de aglomerados após a mistura mais acentuada nas pastas com SBR. Paralelamente à formação desses aglomerados houve a incorporação de ar que é uma característica dos aditivos. No entanto a quantidade racional de ar incorporado a pasta facilita seu espalhamento nas áreas de assentamento ou revestimento, os melhores resultados foram visualizados a partir do traço 03 e 06 apresentando maiores viscosidades e menores áreas tixotrópicas.

Estes resultados apresentam concordância com os trabalhos realizados por Williams *et al.*, (1999), que utilizou diferentes métodos de mistura e taxas de cisalhamento, realizando também medidas de viscosidade e área de histerese reológica, que foram obtidas através de ensaios de fluxo com patamares de aceleração e desaceleração em suas misturas de argamassas.

Segundo estudos propostos por *Betioli* (2007), destaca-se em suas conclusões que pastas cimentícias modificadas com látex polimérico são mais fáceis de espalhar, devido ao efeito de rolamento de suas diminutas partículas, bem como pela presença dos tensoativos usados na sua polimerização, que atuam como dispersante estérico e desta forma retarda a adsorção do cimento.

RCC



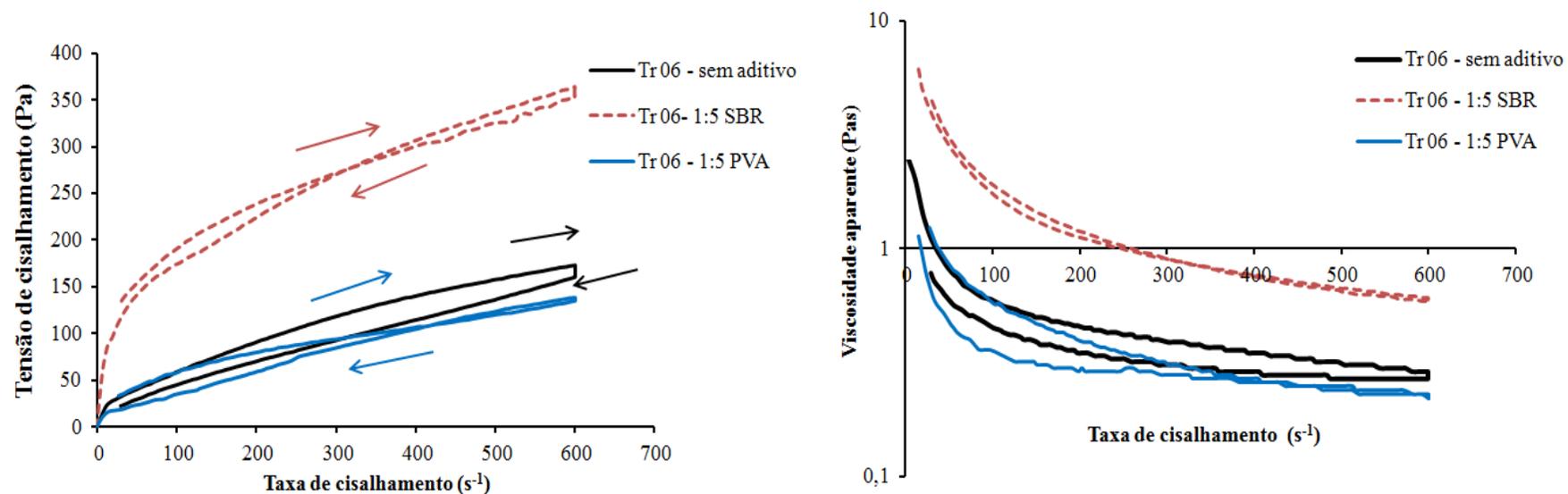


Figura 4.39 - Curva de fluxo para os traços 01, 03 e 06 fabricados a partir do RCC em comparação com e sem adição de polímero.

4.5.6 Modelos Reológicos

4.5.6.1 Modelo Reológico para Argamassas Elaboradas a Partir do RMCS com e sem Aditivos Orgânicos PVA e SBR.

Em relação às propriedades reológicas de materiais cimentícios, espera-se que sejam fluidos não newtonianos, pseudo plásticos e tixotrópicos (SUMAN, 1986 e NELSON, 2006).

Devido a fenômenos complexos que ocorrem no processo de hidratação de pasta cimentícias, parâmetros tensão limite de escoamento, tixotropia e viscosidade plástica, tendem a ter suas características acentuadas ao longo do tempo de análise (SUMAN, 1986; NELSON, 2006 e SHAHRIAR, 2011).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 23, destacou-se os modelos de *Bingham*, *Herschel-Bulkley*, *Casson* e *Power Law*, para as argamassas elaboradas nesta pesquisa, observa-se que tanto as pastas elaboradas a partir do resíduo 01 quanto as pastas elaboradas com resíduos 02, com e sem aditivos poliméricos, apresentaram excelentes correlações com os 4 modelos reológicos encontrados em literatura.

Mais especificamente é esperar que o comportamento reológico das pastas cimentícias seja avaliado em termos de modelos reológicos de *Bingham* e *Herschel-Bulkley*, caso a suspensão satisfaça a relação de *Bingham*, o seu comportamento reológico pode ser caracterizado através de dois parâmetros, considerado como propriedades do material: a tensão limite de escoamento, τ_0 , e a viscosidade aparente, (η).

A expressão proposta por *Herschel-Bulkley* também é dependente do parâmetro (τ_0) por apresentar parâmetros que relacionam o índice de consistência (k) e o índice de comportamento do fluido(n), fatores esses que envolvem propriedades que podem levar em consideração os efeitos das reações que ocorrem devido aos componentes que fazem parte da mistura (reação química, teor de água de amassamento, granulometria etc...) (CAMÕES, 2002 e SENFF, 2010).

Entretanto cabe destacar os modelos que possuem a tensão inicial de escoamento (τ_0), pois os ajustes matemáticos dessa propriedade ocorreram através dos principais modelos, que possuem esse parâmetro em suas equações, neste caso foram representativos os modelos reológicos de *Bingham*, *Herschel-Bulkley* e *Casson*.

Tabela 4.10 - Modelos reológicos de Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Power Law para os melhores traços do 2º experimento fabricados a partir do RMCS com e sem aditivo polimérico PVA e SBR.

RMCS														
ARGAMASSA SEM ADITIVO	BINGHAM			HERSCHEL-BULKLEY				CASSON				POWER LAW		
	τ_0 (Pa)	η_p (Pa.s)	R ²	τ_0 (Pa)	K	n	R ²	τ_0 (Pa)	n	η_p (Pa.s)	R ²	a	b	R ²
Traço 06	121,1	0,0555	0,8136	33,8	61,3	0,09783	0,9358	22,68	0,5	0,1388	0,9983	8,194	0,4871	0,9985
Traço 08	58,03	0,1676	0,9556	1,5118	14,53	0,3621	0,9987	21,96	0,5	0,1953	0,9955	15,23	0,3562	0,9987
Traço 09	60,5	0,2087	0,9824	2,877	4,387	0,5544	0,9964	22,32	0,5	0,16705	0,9966	5,014	0,5361	0,9964
ARGAMASSA 1:5 SBR	BINGHAM			HERSCHEL-BULKLEY				CASSON				POWER LAW		
	τ_0 (Pa)	η_p (Pa.s)	R ²	τ_0 (Pa)	K	n	R ²	τ_0 (Pa)	n	η_p (Pa.s)	R ²	a	b	R ²
Traço 06	49,05	0,2484	0,9641	10,62	11,43	0,4429	0,999	44,44	0,5	0,1	0,9798	8,194	0,4871	0,9985
Traço 08	35,01	0,2336	0,9771	6,107	6,126	0,5189	0,9996	34,39	0,5	0,09324	0,9752	4,73	0,5542	0,9993
Traço 09	42	0,2964	0,9782	7,86	7,125	0,5313	0,9996	20,93	0,5	0,16	0,9937	5,435	0,5685	0,9993
ARGAMASSA 1:5 PVA	BINGHAM			HERSCHEL-BULKLEY				CASSON				POWER LAW		
	τ_0 (Pa)	η_p (Pa.s)	R ²	τ_0 (Pa)	K	n	R ²	τ_0 (Pa)	n	η_p (Pa.s)	R ²	a	b	R ²
Traço 06	45,9	0,166	0,9603	0,3655	9,899	0,4083	0,9994	44,95	0,5	0,09707	0,9129	10,04	0,4064	0,9994
Traço 08	30,68	0,06647	0,9864	24,32	0,623	0,6652	0,9935	34,39	0,5	0,09324	0,9752	10,68	0,2824	0,968
Traço 09	50,7	0,1338	0,9779	28,74	3,134	0,5343	0,9929	3433	0,5	0,0485	0,9923	14,71	0,3294	0,9845

4.5.6.2 Modelo Reológico para Argamassas Elaboradas a Partir do RCC com e sem Aditivos Orgânicos PVA e SBR.

Para a argamassa produzida a partir do RCC em relação a adição de polímero PVA e SBR, verificou-se a também uma natureza pseudoplástica nas características reológicas das amostras de acordo com as correlações apresentadas na Tabela 24, observou-se que ocorreram significativas variações entre os procedimentos de mistura que resultaram em misturas com desempenhos favoráveis relacionados com os parâmetros reológicos a aproximação dos resultados experimentais assim como as pastas formuladas com resíduo 01, também apresentaram melhores correlações de R² aos modelos de Bingham e Herschel – Bulkley como ressalta a literatura (GANG *et al.*,2008 e CARDOSO *et al.*,2015)

Também é importante destacar que não somente esses modelos reológicos foram significativos nas argamassas analisadas nesta pesquisa, mas também a modelagem reológica mostrou melhores ajustes aos modelos de Casson e Power Law, apresentando melhores ajustes em termos de R². Tanto para as argamassas dosadas com PVA e SBR, quanto para as argamassas sem aditivo.

Este modelo tem sido frequentemente utilizado para descrever fluidos que possuem partículas em suas fases. Neste modelo, as argamassas são consideradas como um material de duas fases, contendo uma matriz fluida (pasta de cimento). Nesta categoria de modelo reológico, assume-se que a tensão inicial é os resultados da soma das tensões de cisalhamento resultantes do fluxo da pasta é do movimento dos agregados agregado das partículas e da interação entre a pasta de cimento e o agregado.

Tabela 4.11 - Modelo reológico de *Bingham*, *Herschel-Bulkley*, *Casson* e *Power Law* para os melhores traços do 2º experimento fabricados a partir do RCC com e sem aditivo polimérico PVA e SBR.

RCC														
ARGAMASSA SEM ADITIVO	BINGHAM			HERSCHEL-BULKLEY				CASSON				POWER LAW		
	τ_0 (Pa)	η_p (Pa.s)	R ²	τ_0 (Pa)	K	n	R ²	τ_0 (Pa)	n	η_p (Pa.s)	R ²	a	b	R ²
Traço 01	42	0,3131	0,988	5,069	4,86	0,5985	0,9986	17,15	0,5	0,1268	0,9983	4,061	0,6235	0,9986
Traço 03	26,08	0,2744	0,9908	7,54	1,485	0,7468	0,9956	29,35	0,5	0,1945	0,9995	2,255	0,687	0,9952
Traço 06	15,02	0,2179	0,9959	4,117	0,8014	0,8044	0,9987	22,68	0,5	0,1388	0,9983	1,103	0,7584	0,9984
ARGAMASSA 1:5 SBR	BINGHAM			HERSCHEL-BULKLEY				CASSON				POWER LAW		
	τ_0 (Pa)	η_p (Pa.s)	R ²	τ_0 (Pa)	K	n	R ²	τ_0 (Pa)	n	η_p (Pa.s)	R ²	a	b	R ²
Traço 01	56,9	0,4546	0,967	28,42	11,85	0,5233	0,9919	46,1	0,5	0,1735	0,9917	6,378	0,6077	0,9903
Traço 03	149,5	0,4989	0,9522	16,52	39,82	0,3735	0,9985	65,97	0,5	0,258	0,9861	33,01	0,3972	0,9982
Traço 06	124,5	0,4379	0,9707	15,13	20,95	0,439	0,9986	68,25	0,5	0,1612	0,9908	26,5	0,4084	0,9984
ARGAMASSA 1:5 PVA	BINGHAM			HERSCHEL-BULKLEY				CASSON				POWER LAW		
	τ_0 (Pa)	η_p (Pa.s)	R ²	τ_0 (Pa)	K	n	R ²	τ_0 (Pa)	n	η_p (Pa.s)	R ²	a	b	R ²
Traço 01	45,75	0,2197	0,9796	9,106	4,932	0,5425	0,9974	45,39	0,5	0,1871	0,9774	7,228	0,4905	0,9969
Traço 03	68,22	0,2859	0,9862	47,18	1,662	0,7371	0,9907	30,15	0,5	0,1701	0,9993	11,05	0,4716	0,9834
Traço 06	35,94	0,2492	0,9872	1,772	3,736	0,6009	0,9991	22,68	0,5	0,1388	0,9983	4,048	0,5897	0,9991

Cabe ressaltar que dentro de um contexto matemático os modelos reológicos destacados nesta pesquisa assumem como principal parâmetro de referência o modelo de *Bingham*, pois de acordo com estudos de literatura os mesmos são modelos generalizados de *Bingham*. No entanto modelo de Casson em casos particulares tem sido usado frequentemente para descrever a taxa constante de cisalhamento-cisalhamento modelando matematicamente (CHABRA e RICHARDSON, 2008).

Em relação à aplicação dos dois tipos de polímeros nesta pesquisa, conclui-se que os polímeros PVA e SBR, possuem características de aplicação distintas, porém boas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Seu uso irá depender do tipo de aplicação, em que será utilizada a argamassa (parede, teto, piso ou confecção de placa cerâmica, etc).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Nesta etapa encontram-se as principais conclusões deste trabalho. Ressalta-se que os resultados obtidos devem ser comparados, confrontados e mencionados no futuro através de novas pesquisas, que apresentem resultados que possam complementar os parâmetros obtidos nesse estudo. Dentre as principais conclusões vale destacar de acordo com os tópicos abordados:

- Em relação às principais etapas de caracterizações desses materiais, os resultados permitiram concluir que os resíduos estudados se enquadram dentro das características de agregado miúdo e pozolânico realizados de acordo com as normas NBR 7211/2009, NBR 7181/1984, NBR15115/2004, não oferecendo riscos à saúde humana e contaminação ambiental de acordo com a norma NBR 10004/2004.
- Referente ao teor de água na mistura das argamassas, constatou-se que para RMCS e RCC, a relação a/ag de 0,40 foi a mais adequada nas proporções das misturas por apresentar maiores valores de resistência mecânica, e ao mesmo tempo reduzindo os valores de porosidade aparente para os corpos fabricados.
- Para o experimento considerando os corpos de prova aditivados com polímeros PVA e SBR, a argamassa aditivada a partir do RMCS e RCC verificou-se que de uma maneira geral ocorreu:
- Um significativo ganho de resistência para ambos os polímeros PVA e SBR. Para os traços que tiveram o PVA em sua composição os mesmos apresentaram um ganho maior de resistência, em destaque os traços (tr6 e tr9) elaborados a partir do RMCS, apresentando ganho de 45 e 55% respectivamente.
- Quando aditivados com SBR os mesmos traço (tr6 e tr9), apresentaram aumento de 22 e 36,4% respectivamente, tendo apenas o traço (tr8) apresentando menores resistências tanto sendo aditivado com PVA quanto com SBR.
- Para as argamassas confeccionadas com RCC verificou-se que o efeito da adição dos polímeros orgânicos apresentou as mesmas características, de ganho de resistência,

verificado nos traços (tr1, tr2 e tr3), sendo que as que tiveram o aditivo PVA seu ganho foi maior seguido posteriormente pelos traços (tr1, tr2 e tr3) aditivados com SBR.

Na parte de reologia os efeitos reológicos dos três tipos de agregados na matriz (Cimento/resíduo/H₂O/polímero), chegamos as seguintes conclusões:

- Na curva de trabalhabilidade, de uma forma geral, ocorreu aumento do torque com o passar do tempo devido à hidratação da mistura, no entanto, a pasta confeccionada a partir do RMCS, o ensaio de avaliação do torque foi mais prolongado em relação a pasta confeccionada com RCC.
- Nas análises de curvas de fluxo, observou-se que para todas as argamassas neste trabalho, apresentaram a característica de pseudoplasticidade com tensão inicial de escoamento, apresentando área de histerese distintas em níveis de tixotropia, trazendo melhoria na trabalhabilidade e menos desgaste na aplicação desse material ao seu substrato.
- As pastas elaboradas a partir do RMCS e RCC com e sem aditivo poliméricos apresentaram excelentes correlações com os 4 modelos reológicos encontrados em literatura (Bingham, Herschel-Bulkley, Casson e Power Law), colaborando com que ressalta a literatura.

Vale ressaltar que de acordo com as condições experimentais que foram estabelecidas neste trabalho, os dois tipos de resíduo RMCS e RCC em conjunto com um terceiro CV, apresentam grande potencial para utilização em argamassas sem função estrutural, mas com aplicações de resistência moderada, fator esse limitante em relação à pesquisa.

Um outro fator limitante é o uso dos polímeros PVA e SBR aplicados a esses rejeitos em canteiros de obra, verifica-se que para ambos polímero quando utilizados em excesso os mesmos alteram significativamente o estado de flocculação das argamassas, neste caso para o PVA o mesmo reduz a viscosidade do sistema podendo, inclusive, reduzir o limite de escoamento, o que causa grande prejuízo em termos de qualidade do produto, para o SBR ocorre a introdução de ar no sistema aumentando a porosidade no estado endurecido, trazendo fragilidade no material.

É importante destacar a grande a grande valia em relação ao passivo ambiental deixado pelas empresas que gerenciam projetos na área da indústria da construção civil e da indústria da mineração, projetos esses que geram grande volume de resíduos sólidos não só na nossa região como em todo país.

Logo esta pesquisa contribuiu de forma significativa indicando soluções que reutilizem este resíduo quando esses materiais são reintroduzidos como agregados miúdos em matrizes cimentícias dentro da área da indústria da construção civil, o que buscou demonstrar que é possível diminuir o grande impacto ambiental gerado, quando esses materiais são descartados de forma direta no meio ambiente sem nenhum tratamento ou critério técnico.

Desta forma, conclui-se a contribuição desse trabalho dentro da formulação de um processo de caráter ambiental e auto-sustentável do ponto de vista da lógica de valorização e reaproveitamento de resíduos sólidos gerados a partir de canteiros de obras de construção e demolição, bem como de resíduos gerados da indústria de mineração do Cobre e da cadeia produtiva do Alumínio do estado do Pará.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalho que trazem como tema a valorização e reaproveitamento de resíduos sólidos em matrizes cimentícias, possuem assuntos bastante abrangentes e interessantes em nossa sociedade e pode ser estudado de diversas formas, abaixo se encontram algumas sugestões para realização de trabalhos futuros:

- Avaliação da aderência de argamassas modificadas com polímero, em pavimento, parede e teto avaliados em ensaios de arrancamento.
- Estudar a avaliação do uso de resíduo de cobre e de resíduos de obras da construção civil na produção de argamassas, tendo como carga fibras orgânicas.
- Desenvolvimento de concreto geopolimérico a partir da reutilização de resíduo da construção civil e de rejeitos de barragens da indústria de mineração.
- Aplicação de blending de lodo de chorume em matriz cimentícias e geopoliméricas.
- Realizar análise estatística utilizando o teste de Friedman de caráter não-paramétrico desenvolvido para detectar diferenças nos tratamentos de dados experimentais.
- Realizar análise estatística utilizando o teste de Friedman não-paramétrico desenvolvido para detectar diferenças nos tratamentos de dados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 6459: “*Determinação do Limite de Liquidez*”, Rio de Janeiro, 2016.

____ ABNT, NBR NM 23: “*Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação da massa específica*”, Rio de Janeiro, 2001.

____ ABNT, NBR NM 24: “*Materiais Pozolânicos – Determinação do Teor de Umidade*”, Rio de Janeiro, 2003.

____ VABNT, NBR 6502: “*Rochas e solos*”, Rio de Janeiro, 1995.

____ ABNT, NBR 6457: “*Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de compactação e ensaios de caracterização*”, Rio de Janeiro, 1986.

____ ABNT, NBR 7181: *Solo - Análise Granulométrica*, Rio de Janeiro, 1984.

____ ABNT, “NBR 7215: “*Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*”, Rio de Janeiro, 2004.

____ ABNT, NBR 10004: *Resíduos – Classificação*, Rio de Janeiro, 2004.

____ ABNT, NBR 13279: “*Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*”, Rio de Janeiro, 2005.

____ ABNT, “NBR 12653: *Materiais Pozolânicos*”, Rio de Janeiro, 2014.

____ ABNT, “NBR15115: “*Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação e Procedimentos*”, Rio de Janeiro 2004.

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

____ ABNT, NBR NM 67/98 *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*”, Rio de Janeiro, 1998.

____ ABNT, “NBR 11578: *Cimento Portland comum: Especificação*”, Rio de Janeiro, 1991.

____ ABNT, NBR NM 248: *Agregados-Determinação da Composição Granulométrica*, Rio de Janeiro, 2003.

____ ABNT, “NBR 13281: “*Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Requisitos*”, Rio de Janeiro, 2005.

____ ABNT, NBR 7211: “*Agregados para concreto*” – *Especificação*, Rio de Janeiro, 2009.

____ABNT, “NBR 11578: *Cimento Portland comum: Especificação*”, Rio de Janeiro, 1991.

____ABNT, “NBR NM 248: *Agregados-Determinação da Composição Granulométrica*”, Rio de Janeiro, 2003.

____ABNT, “NBR 13281: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Requisitos*”, Rio de Janeiro, 2005.

____ABNT, NBR NM 67/98 *Concreto – “Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”*, Rio de Janeiro, 1998.

____ABNT, NBR 13529 (ABNT, 1995) – “*Revestimento de Paredes E Tetos de Argamassas Inorgânicas*”, Rio de Janeiro, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM C618: *Standart specification for coal fly ash and raw of calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete*, Philadelphia, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 360, 1992 *Standard Test Method for Ball Penetration in Fresh Portland Cement Concrete*.

RESOLUÇÃO CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002. Publicada no DOU N° 136, de 17 de julho de 2002, Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, – “ME 093/1994: *Determinação da densidade real*”, São Paulo.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – ME 094/94- *Concreto – determinação da consistência pelo consistômetro Vebê*.

ACI 211.3R-02 *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*, Reported by ACI Committee 211

ACI Committee 232, 1996, **Use of fly ash in concrete**, ACI committee report 232.2R-96, ACI, April, pp. 34.

ADÁNEZ, J.; DIEGO, L. F; GARCÍA- LABIANO, F. *Calcination of calcium acetate and calcium magnesium acetate: effect of reacting atmosphere*. Fuel, vol.78, p.583-592, (1999).

AFRIDI, M. U. K. et al. **Strength and Elastic Properties of Powdered and Aqueous Polymer- Modified Mortars**. Cement and Concrete Research, v. 24, p. 1199-1213, 1994.

AFRIDI, M.U.K.; OYAMA, Y.; DEMURA, K.; IQPAL, M.Z. **Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars**. Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 11, November 2003.

AHMARUZZAMAN, M.; **A review on the utilization of fly ash.** Department of Chemistry, National Institute of Technology Silchar, Silchar-788010, Assam, India Progress in Energy and Combustion Science 2010.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho.** Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000. 667p.

AÏTCIN, Pierre-Claude, 1998, **High-performance concrete**, Modern concrete technology 5, E & FN SPON, London and New York

ALONSO, J. L. and WESCHE, K., 1991, *Characterization of fly ash*, Fly ash in concrete: properties and performance, Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building, RILEM, K. Wesche ed., E&FN SPON, pp. 3-23.

AZEVEDO, A.F.F.L.C. **Betões de elevado desempenho com incorporações de Cinzas Volantes.** Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil-Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 548.3R - State-of-the-art report on polymer-modified concrete.** Detroit, ACI, (1995).

AMORIM, L. V.; PEREIRA, A. S. G.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C. **Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo. Revista Brasileira de engenharia agrícola ambiental.** Vol. 3. n. 2. 1999. p. 222-228.

ANGELIM, RENATO R.; ANGELIM, SUSANE C. M.; CARASEK, HELENA. *Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos nas propriedades das argamassas e dos revestimentos.* In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. **Anais.** São Paulo: ANTAC, 2003. p. 383-398.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** São Paulo, 2005. 167 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da Reologia e da Energia de Impacto na Resistência de Aderência de Revestimentos de Argamassa.** Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 163 p. (2005).

ASAKURA, S e O OSAWA, F . **On Interaction between Two Bodies Immersed in a Solution of Macromolecules.** The Journal of Chemical Physics 22, 1255 (1954).

ATKINS, K. M., EDMONDS, R. N. e MAJUMDAR, A. J. **The hydration of Portland and aluminous cements with added polymer dispersions.** Journal of Materials Science, v. 26, p. 2372-2378, 1991.

AZEVEDO, A.F.F.L.C. **Betões de elevado desempenho com incorporações de Cinzas Volantes**. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil-Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2002.

BACHE, H. H. **Densified cement/ultrafine particle-based materials**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS IN CONCRETE, 2.,1981.

BAHIENSE, A. V.; MANHÃES, R. T. ;ALEXANDRE, J.;XAVIER, G. C.;MONTEIRO, S. N. ; VIEIRA, C. M. F. . **Utilização do planejamento experimental na incorporação do resíduo da indústria cerâmica em argamassa para obtenção da capacidade de retenção de água**. Cerâmica (São Paulo. Impresso), v. 54, p. 395-403, 2008.

BAKHAREV, T. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1233-1246, 2005a.

BALTAR, C.A.M. Processos de Agregação, Capítulo 13. In.: Adão B. da Luz, et. al. Tratamento de Minérios (5 a Edição). CETEM, Rio de Janeiro, 2010.

BANFIL, P.F.G.; SAUNDERS, D. C. On the viscometric examination of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 363-370, (1981).

BANFILL, P. F. G; CRIADO, M; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., **Alkali activated fly ash: Effect of admixtures on paste rheology**. *Rheologica Acta*, v. 48, nº. 4, p. 447-455, (2009).

BANFILL, P.F.G., **“Feasibility of a coaxial cylinders viscometer for mortar”**, **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. 2, pp. 329–339, 1987.

BARBOSA, W. **Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos**, Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, USP, Brasil. Ano de Obtenção: 2010.

BARLUENGA, G; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. "SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour". *Cement and Concrete Research* [online]. March 2004. v. 34, n. 3, pp. 527–535. DOI 10.1016/j.cemconres (2003).

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. **Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 95-105.

BAXTER, L.L. **Ash deposition during biomass and coal combustion: a mechanistic approach**. *Biomass and bioenergy*, vol 4, nº 2, pp 85 – 102, 1993.

BEELDENS, A. et al. From Microstructure to Macrostructure: an Integrated Model of Structure Formation in Polymer Modified Concrete. In: 4th SYMPOSIUM ON POLYMERS IN CONCRETE, 2003, Chunchon, Korea. Proceedings .2003.

BETIOLI, A. M. **A Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Florianópolis - SC: Universidade de Federal de Santa Catarina, 2007.

BIRD, R. B.; STEWARD, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena.** Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1960.

BLOMBLED, P.J. **Comportement rhéologique des pâtes, mortiers et bétons: mesure, évolution, influence de certains paramètres.** Revue des Matériaux de Construction "Ciments et Bétons", v. 617, Fev.1967 apud RAGO, F.

BONAPASTA, A. A. Interaction Between Ca Ions and Poly (acrylic acid) Chains in Macro-Defect-Free Cements: A Theoretical Study. *Chem. Mater.*, v. 13 p. 64-70, 2001.

BONAPASTA, F. Cross-Linking of Poly (vinyl alcohol) Chains by Ca Ions in Macro-Defect-Free Cements. *Chem. Mater.*, v. 14, p. 1016-1022, 2002.

BONEN, D.; SARKAR, S. L. **The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss.** *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 7, p. 1423-1434, Oct. 1995.

BORGES **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)** Paulo Henrique Thuany Marra de Figueiredo Lourenço Ana Flávia Souza Foureaux Luiza Soares Pacheco *Revista Ambiente Construído*

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. **Concreto Armado, eu te amo.** Vol 6. 507 p. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

BOURNE, M. C. **Food texture and viscosity (Concept and management).** New York: Academic Press, 1982.

BRETAS, R.; D'AVILA; **Reologia dos Polímeros Fundidos.** São Carlos, SP, 2000.

BRITO, J.A. **Cidade versus entulho. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2.,** São Paulo, 1999. Anais. São Paulo, Comitê Técnico CT206 Meio Ambiente (IBRACON), 1999. p.56-67.

BUCHWALD, A; ZELLMANN, H.-D; KAPS, C.; Condensation of Aluminosilicate Gels: model system for geopolymer binders. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 357, n. 5, p. 1376-1382, 2011.

CAMÕES, A; FERREIRA, R.M; AGUIAR, B e S. JALALI, S, Durability of high performance concrete with fly ash, Concrete for Extreme Conditions, **Proceedings of the International Conference Challenges of Concrete Construction**, Dundee, Scotland, U.K. 357-366 (2002).

CARDOSO, D. N. P; **"Influência do teor de cinza volante na reologia de argamassa de assentamento. Fabricado com reciclagem de resíduos"** 2014. Dissertação

(Mestrado Em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação Em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém.

CARDOSO, F. A; FUJII ,A. L. , PILEGGI, R. G; CHAOUICHE, M.; Parallel-plate rotational rheometry of cement paste: Influence of the squeeze velocity during gap positioning. **Cement and Concrete Research** vol. 75, pp. 66–74, (2015).

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CASTRO, A.L.; **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** Tese Doutorado – EESC – USP. São Carlos, 2007.

CASTRO, K. F. “**Estudo de Parâmetros Físicoquímicos para a Produção de Argamassas Utilizando Reíduos Industriais e da Construção Civil**”, 2014. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação Em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém.

CHHABRA, R.P; RICHARDSON, J.F. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology. Engineering Applications.** Book • 2nd Edition Authors: and. Browse book Edição: ELSEVIER SCIENCE & TECHNOLOGY, julho de 2008.

CHANDRA, S. e FLODIN, P. Interactions of Polymers and Organic Admixtures on Portland Cement Hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 17, p. 875-890, 1987.

CHAPPUIS, J. Rheological measurements with cement pastes in viscosimeters: a comprehensive approach. In: RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE, 1990, London. Proceedings... London: E & FN Spon, 1991. p. 3-12.

CHENGALA, Xiaosu; CHEN,Qian. **Analysis on the Preparation and Microstructure Characteristics of Cinder Based Ceramics.** In: International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment, 2011, Shangai. **Anais.** Shangai, 2011. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5930546&tag=1>. Acesso em: 12 abr. 2013.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R. **Utilização de rejeitos de pilha zincocarvão em argamassas e concretos de cimento Portland.** **Revista Ceramica.** Vol. 50. n. 316. p. 300-307. 2004.

COUSSOT, P; **Rheometry of Pastes, Suspensions and Granular Materials—Application in Industry and Environment** Wiley, New York, 2005.

COUTINHO A.S., **Fabrico, Propriedades do Betão, Volume I, Ed. Laboratório Nacional Engenharia Civil, Lisboa, (1997).**

COVAS, B “**Resíduos da Construção Civil e o Estado de São Paulo**”, Governo do Estado de São Paulo secretaria do Meio Ambiente e Coordenadoria de Planejamento Ambiental, 2012.

DAL MOLIN, D. C. C.. **Adições minerais para concreto estrutural**. In: Geraldo Isaia. (Org.). CONCRETO. Ensino, Pesquisa e Realizações. 1ed.São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 1-31, (2005).

DEDAVID, Berenice Anina, Carmem Isse Gomes, Giovanna Machado. “**Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**” – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DEWAR, R. J.; JOYCE, M. J. **The thixotropic and rheopetic behavior of maize starch and maltodextrin thickeners used in dysphagia therapy**. Carbohydrate Polymers, vol. 65, p. 296-305, (2006).

DIAS, C. L. P., SILVA, L. M., PERES, A. E. C., VALADÃO, George Eduardo Sales **Utilização de reagentes auxiliares na filtração**. Revista da Escola de Minas, v.57, p.229 - 234, 2004.

DUAN, P., YAN, C.J., LUO, W.J., ZHOU, W., 2016. **A novel surface waterproof geopolymer derived from metakaolin by hydrophobic modification**, Mater. Lett. 164, 172–17.

EROL, M.; Genç, A.; Övecoglu, M.L.; Yücelen, E.; Kücükbayrak, S.; Taptik, Y. **Characterization of a glass-ceramic produced from thermal power plant fly ash**. Journal of the European Ceramic Society, Amsterdam, v.20, p.2209-2214, 2000.

ERSOY, B. Effect of pH and polymer charge density on settling rate and turbidity of natural stone suspensions. *International Journal of Mineral Process*, v. 75, p. 207-216, (2005).

FARDIM, P. Papel e Química de Superfície – Parte I – A Superfície da Fibra e a Química da Parte Úmida. O Papel, p. 97-107, Abril 2002.

FARIAS FILHO, J. de; LUCENA, L. de F. L.; NEVES, G. de A.; FERREIRA, H. C.; LEAL, A. F. **Avaliação da atividade pozolânica de resíduos da construção civil**. 17o CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, 2006.

FERNANDEZ-JIMENEZ, A.; PALOMO, J.; PUERTAS, F. (1999) Alkali activated slag mortars. Mechanical strength behaviour. Cement and Concrete Research 29, pp. 1313-1321.

FERRARIS, C. F.; **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report**. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, v.104, n. 5, p. 461-478, Sept.-Oct. 1999.

FERRARIS, C. F.; **Measurement of rheological properties of high performance concrete: state of the art report**. NISTIR 5869, July. 1996.

FERRARIS, C.F., K.H. Obla, R. Hill, **The influence of mineral admixtures on the rheology of cement past and concrete**, *Cement and Concrete Research*, 31,245-255, (2001).

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. *Rem: Rev. Esc. Minas*. vol.58, n.1, p. 83-87. (2005).
FORMAGINI, Sidiclei. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**, 2005. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil) – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2005.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; **Introdução à mecânica dos fluidos**. Tradução de Alexandre Matos de Souza Melo. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1998. 662p.

FRANTZ, J.D. **Salts of aliphatic carboxylic acids: Raman spectra and ion pairing in hydrothermal solution containing sodium and calcium acetate**. *Chemical Geology*, vol. 164, p.1-20, (2000).

GABAS, A.L; MENEZES, R.S; TELIS-ROMERO, J. **Reologia na indústria de bicompostíveis**. Lavras: INDI, 2012.

GANG, L; KEJIN W; THOMAS J. R.; Modeling rheological behavior of highly flowable mortar using concepts of particle and fluid mechanics. **Cement & Concrete Composites** vol 30, PP 1–12, (2008).

GARCIA, T. L.; NAVES, V. C.; ALVES, J. D.; BARROS, B. de C.; RODRIGUES, C. S. G.; PEREIRA, E. A. A.; ATAIDES, R. L. de A. **Substituição de parte do cimento por finos inertes de pedra em concretos com baixo fator a/c**. IV Seminário de Iniciação Científica. Goiania: 2006. Curso de Engenharia Agrícola. Unidade Universitária de Ciências exatas e tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás.

GASTALDINI, A. L. G. & ISAIA, G. C. Chloride permeability of high performance concrete with mineral addition: binary and ternary mixtures. INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 2. Gramado, Brasil, **Proceedings** 1999.1 CD-ROM.

GIERGICZNY, Z. **The hydraulic activity of high calcium fly ash**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 83, p. 227-232, 2006.

GIERGICZNY, Z. **The hydraulic activity of high calcium fly ash**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 83, p. 227-232, 2006.

GIERGICZNY, Z. **The hydraulic activity of high calcium fly ash**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 83, p. 227-232, 2006. TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, (1997).

GREGORY, J.; BARANY, S. **Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures**. *Advances In Colloid And Interface Science*, v. 169, p. 1 – 12, 2011.

GUNTHER, W.M.R. **Minimização de resíduos e educação ambiental. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7.** Curitiba, 2000. Anais. Curitiba, 2000.

GUPTA, R.P.;T.F; KAJIGAYA, MIYAMAE, S; TSUMIT, Y. **Computer Controlled Scanning Electron Microscopy Of Minerals In Coal – Implications For Ash Deposition.**Prog. Energycombudt.Sci. Vol 24, p. 523-543, 1998.

HEWLETT.P.C., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, (2001).

HILL, R. e STYLES, C. **The influence of polymer chain length on the fracture toughness of polymer-modified Portland cements.** Journal of Materials Science Letters, v. 11, p. 1555-1558, 1992.

HU, C.; De LARRARD, F.; GJ.RV, O. E.; **Rheological testing and modeling of fresh high performance concrete.** Materials and Structures, v. 28, n. 175, p. 1-7, Jan.-Feb. 1995.

IPEA (2012). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Relatório de Pesquisa.** Brasília-DF; 46p.

JARNY,S; ROUSSELB,N; RODTSA, S; BERTRANDA, F; LE ROYB, R; COUSSOTA, P; **Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry.** Cement and concrete Research, v.35, p. 1873-1881, mar. 2005.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

JOHN, V.M.J. **Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2.,** São Paulo, 1999. Anais. São Paulo, IBRACON, 1999. p.44-55.

JOSHI, R. C. and LOHTIA, R. P., *Fly ash in concrete: production, properties and uses, Advances in Concrete Technology*, Volume 2, V. M. Malhotra ed., Gordon and Breach Science Publishers, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 269.1997.

KASSELOURI, V.; DIMOPOULOS, G.; PARISSAKIS, G. **Effect of acetic and tartaric acid upon the thermal decomposition of CaCO₃.** Cement and Concrete Research, Oxford, v. 25, n. 3, p. 477-484, 1995.

KASSELOURI, V.; DIMOPOULOS, G.; PARISSAKIS, G. **Effect of acetic and tartaric acid upon the thermal decomposition of CaCO₃.** Cement and Concrete Research, Oxford, v. 25, n. 3, p. 477-484, 1995.

KHAN, M. N. N.; JAMIL, M., KARIM, M. R.; Zain; M. F. M, KAISH, A. B. M. A. **Filler Effect of Pozzolanic Materials on the Strength and Microstructure Development of Mortar.** Journal of Civil Engineering, Vol 21, p.274–284, (2017).

KHAYAT, K.H., **Viscosity-Enhancing admixtures for cement-based materials- An Overview**, *Cement and Concrete Composites*, 20, 171-188, (1998).

KIRYU, H. S.; **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**, 2006. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica – ciências térmicas) – FEIS – UNESP, Ilha Solteira/SP, 2006.

KNUDSEN, S.K. **Numerical investigation of ash deposition instraw-fired boilers – using CFD as the framework for slagging and fouling predictions. 2001**. Tese de doutorado. Instituto de Tecnologia Energia. Universidade de Aalborg. Dinamarca.

KOSKELA, L. **Application of the New Production Philosophy to Construction**. Austin, Texas: The Construction Industry Institute (CI), 1992 (Technical Report, 72).

KOTOVIEZY, L. A. M. **“Desempenho de composições de argamassas colantes formuladas em laboratório com ênfase no efeito da cura térmica segundo a NBR 14081 4”**. Universidade Federal do Paraná-Programa de Pós-Graduação em Educação Universidade Federal do Paraná, UFPR, (Dissertação de Mestrado), Brasil. 2014.

KUMMER, Larissa, Fátima de Jesus basseti, RIELLA, Humberto Gracher, Júlio César Rodrigues Azevedo. Reutilização dos Resíduos de Polimento de Porcelanato e Feldspato na Fabricação de novo produto cerâmico. *Cerâmica Industrial*, v.12, p.1 - 5, 2007.

L. Glassgol, Refractory shotcrete - the current state of art, *Shotcrete Magazine*, Summer issue (2002) 24-32.

L. Senff, D. Hotza, W.L. Repette, **Comportamento reológico de pastas de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico** *Revista Matéria*, v. 15, nº 1, p. 012 – 020, (2010).

LAAT, A. W. M. **Adsorption of water-soluble polymers onto barium titanate and its effects on colloidal stability**. 1995. Dissertacao – Wageningen UR, The Netherlands, Wageningen, 1995.

LARBI, J. A. e BIJEN, J. M. J. M. **Interaction of Polymers with Portland Cement During Hydration: a Study of the Chemistry of the Pore Solution**. *Cement and Concrete Research*, v. 20, p. 139-147, 1990.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e de demolição**. Porto Alegre, 2001. 270 p. Tese (Doutorado). Programa de Pos-Graduacao em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Tese>

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Sao Paulo, 2001. 194 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construcao Civil. Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo.

LIMA, R.M.F. e DA LUZ, J.A.M. “**Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional**”: lei de Stokes. Rev. Escola de Minas, v. 54, n. 2, Ouro Preto, abr/jun., 2001.

LÓPEZ-ZALDÍVAR, O.; LOZANO-DÍEZ, R.V.; Verdú-VÁZQUEZ, A.; LLAURADÓ-PÉREZ, N. **Effects of the addition of inertized MSW fly ash on calcium aluminate cement mortars**. Construction and Building Materials Vol. 157, Pages 1106-1116, 30 December 2017.

MARQUES, Y.A; VASQUES FILHO, D; Pileggi, R.G; PANDOLFELLI, V. C. **Influência dos aditivos de consolidação sobre as propriedades termomecânicas da matriz de concretos de projeção**. Cerâmica (São Paulo. Impresso), Brasil, v. 50, n.315, p. 231-238, 2004.

MACHADO, J.C.V; **Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. Editora Interciência: Petrobras. Rio de Janeiro, 2002.

MACOSKO, C. W. **Rheology: Principles, Measurements and Applications**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1994.

MANSUR, H. S. ; SADAHIRA, C. M. ; MANSUR, A. A. P. . FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. Materials Science & Engineering. C, Biomimetic Materials, Sensors and Systems, v. 28, p. 539-548, 2008.

MASCARENHAS, J., **Sistemas de construção II- paredes**, Ed. livros horizonte, Lisboa, (2003).

MATTIGOD SV, DHANPAT R, EARY LE, Ainsworth CC. **Geochemical factorscontrolling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues**: I. Review of the major elements. Journalof Environmental Quality1990; 19:188–201.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2008.

MONDAIN-MONVAL, O. et al. Polymer Induced Repulsive Forces:Exponential Scaling. Physical Review Letters, 80 (8), p. 1778-1781, 1998.

MOURA JÚNIOR, Maurício Donato. **Estudo reológico de fluidos de perfuração em diferentes temperaturas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ciência e Tecnologia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis com Sustentabilidade Ambiental) – Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal de Sergipe (2012).

MULLER, A. S.; CASTRO FILHO, F. J. “**Uso do rejeito do beneficiamento do minério de cobre na produção de concreto para elementos pre-moldados.**” Monografia de especialização. UFPA, Parauapebas/PA. 2008.

MULLER, E.M. DA SILVA .”**Estudo da reciclagem de lodo de ETA na fabricação de agregado sintético em mistura com cinza volante de carvão mineral**”, Tese

(Doutorado). Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2016.

NASCIMENTO, CHRISTINE RABELLO. **Reologia e Reometria Aplicadas ao Estudo de Polpas Minerais**. Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCT, 2008. 53p. (Série Rochas e Minerais Industriais, v.12).

NAZARI e SANJAYAN, 2015. Synthesis of geopolymer from industrial wastes *Journal of Cleaner Production*.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AİTCIN, P.-C.; **Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles**. *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 5, p. 687-697, May. 1998.

NELSON, E. B; GUILLOT, D.; *Well Cementing*. 2nd. Sugar Land, Texas, Texas: **Cambridge University Press**, (2006).

NENO, Catarina Jesus Freire. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão**. *Lisboa, 2010*. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa. Dezembro 2010.

NEVILLE, A M. **Properties of Concrete**, Ed. Pitman Publishing, London, (1975).

NEVILLE, ADAM M. *Properties of concrete*, Fourth edition, Longman Group Limited, England, pp. 844; (1995).

NEVILLE, ADAM M., 1995, *Properties of concrete*, Fourth edition, Longman Group Limited, England, pp. 844;

OHAMA, Y. Polymer-based admixtures. **Cement and Concrete Research**, v.20, p.189-212, 1998.

OHAMA, Y. **Recent Progress in Concrete-Polymer Composites**. *Advn. Cem, Bas. Mat.*, v. 5, p. 31-40, 1997.

OTSUBO, Y, MIYAI, S, UMEYA, K, **Time-Dependente Flow of Cement Pastes**. **Cem. Concr.Res**; v. 10, p.-638, 1980.

ORTEGA, F. S.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; SEPULVEDA, P. A. **Defloculação e Propriedades Reológicas de Suspensões de Alumina Estabilizadas com Dispersantes Poliacrílicos**. *Cerâmica Industrial*, v .2, p. 34-37, 1997b.

PARK, C.K., NOHB, M.H., PARKB, T.H., “**Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures**”, *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, pp. 842– 849, 2005.

PETROU, M. F. et al.; **Influence of mortar rheology on aggregate settlement**. *ACI Materials Journal*, v. 97, n. 4, p. 479-485, July. - Aug. 2000b.

PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **Conceitos reológicos aplicados no desenvolvimentode argamassas**. E-Mat (Porto Alegre), v. 3, p. 62-76, 2006.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. How Mixing Affects the Rheology of Refractory Castables, PART 1, PART 2. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 80, n. 6, p. 27-42, 2001.

PILEGGI, R. G.; MARQUES, Yuri Alencar; VASQUES FILHO, Demival ; STUDART, A. R.;PANDOLFELLI, Victor Carlos. **Wet-shotcrete for refractory castables**. American Ceramic Society Bulletin, Estados Unidos, v. 81, n.10, p. 51-56, 2002.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V.C .**Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis**. Cerâmica (São Paulo. Impresso), BRASIL, v. 48, n.305, p. 11-16, 2002.

PILEGGI, R. G., A. E. PAIVA, J. GALLO, V. C. PANDOLFELLI, Am. Ceram. Soc. Bull. **79**, 1 (2000) 54-58.

PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C. “**Reflexões sobre distribuição granulométrica e sua correlação com a reologia de concretos refratários**”, Ceramic News, Special South America (1999) 6 -13

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

RACHAS, I., TADROS, T. F. e TAYLOR, P. **The Displacement of Adsorbed Polymer from Silica Surfaces by the Addition of a Nonionic Surfactant**. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng. Aspects, 161, p.307-319, 2000.

RAGO, F.; **Características reológicas de pastas de cales hidratadas normalizadas e de cimento**. 1999. 207p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo/SP. 1999.

REIS, J. F. A. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO **Determinação de Parâmetros Reológicos de Concretos Através do Ensaio de Abatimento de Tronco de Cone Modificado: Estudo de Caso**. Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho” Campus De Ilha Solteira; Ilha Solteira - SP, 2008.

RHA, C. Y. et al. **Properties and interaction of cement with polymer hardened cement pastes added absorbent polymer**. Journal of Materials Science, 34, p. 4653-4659, 1999.

RIBEIRO, C.C; PINTO, J.D.S; STARLING, T. **Materiais de construçãocivil**, 2ª E.Belo Horizonte : Editora UFMG, 2002.101p.

RIXON, R., MAILVAGANAN, M. **Chemical admixtures for concrete**. 3rd Edition. E& FN Spon. London. 1999.

ROCHA JUNIOR, C. A. F. 2011. **Caracterização Física, Química e Mineralógica de Cinza Leve de Caldeira e sua Utilização na Síntese de Zeólitas e Aplicação do Material Zeolítico na Adsorção de Cu^{+2} e Cd^{+2}** . Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, 2011.

RODRIGUES, C. D. S. **Avaliação de diferentes tratamentos de base aplicados sobre alvenaria de bloco cerâmico na aderência da argamassa: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, (2011).

ROSELLO, M. T. V. **Morteros de cimento para albanileria**. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1976. 55 p.

CARVALHO de, R. N. F. M; **“Reciclagem de resíduos industriais na fabricação de argamassas e placas cerâmicas premoldadas fabricadas a partir de matriz sílico-aluminosa destinadas a construção civil”**. Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Pará, 2014.

ROTHSTEIN, D., THOMAS, J. J., CHRISTENSEN, B. J., JENNINGS, H. M. **Solubility behavior of Ca-, S-, Al-, and Si-bearing solid phases in Portland cement pore solutions as a function of hydration time**. *Cement and Concrete Research*, v. 32, p. 1663-1671, 2002.

ROUSSEL, N.; Le ROY, R.; **The Marsh cone: a test or a rheological apparatus**. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, p. 823-830, May. 2005.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. **A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow**. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 3, p. 363-371, Mar. 2004.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicocalcária**. São Paulo. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SAKAI, E. e SUGITA, J. **Composite Mechanism of Polymer Modified Cement**. *Cement and Concrete Research*, v. 25, p. 127-135, 1995.

SANGHAMITRA, K., AMAN, A., SIDDHARTH M., BHARGAVA, K. D., 2016, **“Stabilization characteristics of copper mine tailings through its utilization as a partial substitute for cement in concrete: preliminary investigations”**. *Environ Earth Sci*, 75:227.

SASAOKA, E.; SADA, N.; UDDIN, M.A. **Preparation of macroporous lime from natural lime by swelling method with acetic acid for high-temperature desulphurization**. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 37, n. 10, p. 3943-3949, 1998.

SCANADOLARA, J.P. **Propriedades de argamassas obtidas pela substituição parcial de cimento portland por rejeitos particulados de tijolo**. 2010. Dissertação (Mestrado em ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do estado de Santa Catarina, centro de Ciências Tecnológicas – CCT, Joinville.

SCHRAMM, G.; **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Tradução de Cheila G. Mothé; Denise Z. Correia; Hans M. Petri; Michelle Gonçalves; Tatiana Carestiatto. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. São Paulo, 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SEFFF, L.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J.A. **Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortar**, Civil Engineering Dimension, Vol. 12, nº. 1, March, p.18- 22, (2010).

SHAHRIAR, Anjuman. *Investigation on Rheology of Oil Well Cement Slurries* [online]. Ontario, Canada: University of Western Ontario, 2011. Available from: <http://ir.lib.uwo.ca/etd>.

SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento portland**. Florianópolis: Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, (2001).

SILVA, D.A. e ROMAN, H.R. **Caracterização Microestrutural de Pastas de Cimento Aditivadas com Polímeros HEC e EVA**. In: IV SIMPOSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS – IV SBTA, 2001, Brasília, Brasil. Anais ... Sao Paulo: Páginas & Letras Editora e Grafica Ltda., 2001. p. 15-41.

SILVA, D.A.; ROMAN, H. R. **Caracterização microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Florianópolis, (2001).

SILVA, D.A.; ROMAN, H. R. **Caracterização microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Florianópolis, (2001).

SILVA, D.A.; ROMAN, H. R. **Caracterização microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Florianópolis, (2001).

SILVA, I. J.; **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. 2000. 279p. Tese (Doutorado em Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 2000.

SIQUEIRA, J.S. de. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

SJOBERG, M. et al. **The Effect of Polymer and Surfactant Adsorption on the Colloidal Stability and Rheology of Kaolin Dispersions**. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng. Aspects, 159, p. 197-208, 1999.

SO, J. H. et al. **Effects of Polyvinyl Alcohol on the Rheological Behavior and Phase Stability of Aqueous Silica Suspensions**. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 34 (2), p. 262-268, 2001.

SOKOLAR, Radomir; VODOVA, Lucie. **The effect of fluidized fly ash on the properties of dry pressed ceramic tiles based on fly ash–clay body**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884211003774>>. Acesso em: 27 abr. 2012.

STEWART, P. A.; HEARN, J. e WILKISON, M. C. **An Overview of Polymer Latex Film Formation and Properties**. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 86, p. 195-267, 2000.

STRUBLE L., G.K. Sun, **Viscosity of Portland cement past as a function of concentration**, *Advances on Cement Based Materials*, 2, 62-69, (1995).

SU, Z. et al, **The Evolution of the Microstructure in Styrene Acrylate Polymer-Modified Cement Pastes at the Early Stage of Cement Hydration**. *Advanced Cement Based Materials*, v. 3 p. 87-93, 1993.

SUNDQVIST, A, SELLGREN, A, G. ADDIE, **“Slurry pipeline losses for coarse and high density industrial products”**, *Powder Technol.* **89** (1996) 19-28.

SUMAN, G. O., ELLIS, R. C., PARKER, P; CLEMENT, C; GOINS, W. C., COOK, C.; CARTER, L. G. a CALLEHAN, R. B. *Cementing Program. Aberdeen, Scotland :Weatherford International Inc.*, (1986).

TANNER, R.I.; **Engineering rheology**. Ed.rev. New York: Oxford University Press, 1988. 451p

TANCREDI, G. A.H. **Estudo Das Propriedades do Concreto Com Adição de Cinza de Carvão Mineral**. 2010. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação Em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém.

TATTERSALL, G.H.; BANFILL, P.F.G. **The rheology of fresh concrete**. London: Pitman 1983. 347p.

TATTERSALL, G.H. **workability and quality control of concrete**. London: E & FN Spon, 1991b. 262p.

TAYLOR, Harold F W. *Cement Chemistry*. 2nd. London, UK: Thomas Telford,. ISBN 0 7277 2592 0. (1997).

UKRAINCYK, N; ROGINA, A. **"Styrene–butadiene latex modified calcium aluminate cement mortar"**. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2013. v. 41, n. August 2015, pp. 16–23 (2013).

UKRAINCYK, N; ROGINA, A. **"Styrene–butadiene latex modified calcium aluminate cement mortar"**. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2013. v. 41, n. August 2015, pp. 16–23 (2013).

UNIQUEMA. Atlox^R Polymeric Surfactants: Agricultural Applications. Disponível em: <www.uniquema.com/cpa/lit/cp4/pg2.htm>. Acesso em: 23/01/2006.

VAN WAZER, J.R. et al. **Viscosity and flow measurement: a laboratory handbook of rheology**. 2ed. New York: Interscience Publishers, 1966. 406p.

WALLEVIK, O. H.; GJ.RV, O. E.; **Development of a coaxial cylinders viscometer for fresh concrete**. In: PROPERTIES OF FRESH CONCRETE, 1990, Hanover/Germany. Proceedings... London: Chapman and Hall, 1990a. p. 213-224.

WARREN, J; “Conservation of Brick”, cap. 12- **Mortars, Rendering and Plasters**, Butterworth Heinemann, England, 1999.

WILLIAMS, D.A, A.W; JENNINGS, H.M. **The of mixing on rheology of fresh cement past**. *Cement and Concrete Research* 29 p. 1491-1496. (1999).

YAMMINE, J. *et al.* **From Ordinary Concrete to Self Compacting Concrete: a transition between frictional and hydrodynamic interactions**. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 7, p. 890-896, 2008.

YANG, Q, ZHU, P, WU, X, HUANG, S., **Properties of concrete with a new type of saponin air-entraining agent**, *Cement and Concrete Research*, 30, 1313-1317, (2000).

YLINIEMI; PAIVA; FERREIRA; TIAINEN; ILLIKAINEN. **Development and incorporation of lightweight waste-based geopolymer aggregates in mortar and concrete**. *Construction and Building Materials*, vol 131, 7-9, (2017).

YOUNG, J.F. S. MINDESS, R.J. GRAY, A. BENTUR, **The Science and Technology of Civil Engineering Materials**, Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey, (1998).

ZHANG, D.S., **Air entrainment in fresh concrete with PFA**, *Cement and Concrete Composites*, 18,409-416, (1996).

ZHANG, X.; HAN, J.; **The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste**. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 5, p. 827-830, May. 2000.

ZHIXIN, J; QIWEN, L.; SONG, W.; YONGJUN, C.; XIANGYANG, Z., MINGXIAN, L; YUANFANG, L.; DEMIN, J. **Solid-phase preparation method of silica-supported 2,20-methylenebis(6-tert-butyl-4-methyl-phenol) and its antioxidative behavior in styrene-butadiene rubber**. *Inc. J. Appl. Polym. Sci.* 3-8, (2016).

ZUHUA ZHANG, HAOWANG, YINGCAN ZHU, ANDREW, R, JOHN L. PROVIS, FRANK, B- **Using fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis**, *Applied Clay Science* 88–89 (2014) 194–201.

APÊNDICE A**MATRIZES E TABELAS DE PROPORÇÃO**

Tabela A.1 - Massa total da mistura para elaboração de 1 corpo de prova

	(g)
1 corpo-de-prova	250,00
10 corpos-de-prova	2.500,00
Extra	250,00
Mtotal	2.750,00

APÊNDICE B

As tabelas abaixo apresentam todos os dados obtidos nos ensaios de absorção aparente por imersão, porosidade aparente, massa específica aparente e resistência à compressão.

Tabela B.1 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RMCS.

Traços	massa seca (g)	massa úmida (g)	massa imersa (g)	AA (%)	PA (%)	MEA (%)	Resist à Comp (MPa)
Tr1	210	222,7	55,4	6,048	7,591	0,109	3,83
Tr1	200	213,9	42,7	6,950	8,119	0,163	3,24
Tr1	209	219,8	45	5,167	6,178	0,115	3,15
Tr1	236,5	247,1	54,9	4,482	5,515	0,082	3,78
Média	213,87 5	225,875	49,5	5,662	6,851	0,117	3,5
Desvio Padrão	15,739	14,616	6,594	1,072	1,210	0,034	0,3546 8
Tr 2	195,6	206,3	42	5,470	6,512	0,130	1,62
Tr 2	188,8	201,5	40,6	6,727	7,893	0,166	1,13
Tr 2	198,2	212	45	6,963	8,263	0,155	1,18
Tr 2	220,4	235,9	54	7,033	8,521	0,130	1,77
Média	202,46 6	216,466	46,533	6,907	8,226	0,150	1,36
Desvio Padrão	16,226 3	17,629	6,830	0,160	0,316	0,018	0,3559 4
Tr3	159,9	182,4	20	14,071	13,855	0,704	1,23
Tr3	160,2	178	18,6	11,111	11,167	0,597	1,43
Tr3	166	181,1	19,8	9,096	9,361	0,459	1,13
Tr3	164,6	181,6	19,2	10,328	10,468	0,538	1,43
Média	162,67 5	180,775	19,4	11,152	11,213	0,575	1,305
Desvio Padrão	3,086	1,925	0,632	2,116	1,912	0,103	0,15
Tr4	196,7	211,1	41,7	7,321	8,501		2,16
Tr4	213,4	226,3	45,4	6,045	7,131	0,133	2,7
Tr4	214	228,4	47	6,729	7,938	0,143	2,46
Tr4	184,8	198,4	42,2	7,359	8,707	0,174	2,51
Média	204,06 6	217,7	44,866	6,711	7,925	0,150	2,556
Desvio Padrão	16,688 1	16,7472	2,444	0,657	0,788	0,022	0,126
Tr5	207	221,5	57	7,005	8,815	0,123	3,34
Tr5	223	234,2	61,6	5,022	6,489	0,082	3,59

Tr5	225,1	233,5	61,3	3,732	4,878	0,061	3,54
Tr5	211,2	221,2	57,9	4,735	6,124	0,082	3,78
Média	219,76 6	229,633	60,266	4,496	5,830	0,075	3,636
Desvio Padrão	7,492	7,311	2,055	0,678	0,845	0,012	0,126
Tr6	224	237,3	62,2	5,938	7,596	0,095	4,62
Tr6	222,1	231,6	61,6	4,277	5,588	0,069	4,37
Tr6	221,6	230,7	63	4,107	5,426	0,065	4,52
Tr6	222,3	236	64	6,163	7,965	0,096	4,52
Média	222,5	233,9	62,7	5,121	6,644	0,082	4,5075
Desvio Padrão	1,042	3,240	1,0392	1,079	1,323	0,017	0,103
Tr7	196,7	204	48,7	3,711	4,701	0,076	2,8
Tr7	201,8	207	49,8	2,577	3,308	0,052	2,41
Tr7	212,8	217,1	54,4	2,021	2,643	0,037	2,7
Tr7	230,8	237,5	61,6	2,903	3,809	0,047	3,19
Média	210,52 5	216,4	53,625	2,803	3,615	0,053	2,775
Desvio Padrão	15,094	15,1417	5,8619 5	0,707	0,867	0,017	0,322
Tr8	239,2	248,2	75,8	3,763	5,220	0,050	3,69
Tr8	253,7	262,8	77,2	3,587	4,903	0,046	3,78
Tr8	233,4	241,5	74,7	3,470	4,856	0,046	4,62
Tr8	237,8	248,3	77,7	4,415	6,155	0,057	3,34
Média	241,02 5	250,2	76,35	3,809	5,284	0,050	3,857
Desvio Padrão	8,803	8,982	1,362	0,422	0,603	0,005	0,542
Tr9	241,7	249,4	85,8	3,186	4,707	0,037	4,08
Tr9	253,7	260,1	91	2,523	3,785	0,028	4,28
Tr9	239,6	246,1	85,4	2,713	4,045	0,032	3,73
Tr9	238,7	244,2	88	2,304	3,521	0,026	4,18
Média	243,42 5	249,95	87,55	2,681	4,014	0,031	4,067
Desvio Padrão	6,964	7,099	2,568	0,375	0,509	0,005	0,239
Tr10	222,3	232,5	60,7	4,588	5,937	0,076	2,36
Tr10	211,8	220	56,7	3,872	5,021	0,068	2,41
Tr10	217,4	222,7	57,6	2,438	3,210	0,042	2,36
Tr10	220,5	226	58,5	2,494	3,284	0,043	2,21
Média	218	225,3	58,375	3,348	4,363	0,057	2,335
Desvio Padrão	4,602	5,390	1,715	1,060	1,342	0,017	0,086

Tabela B.2 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RCC.

Traços	massa seca (g)	massa umida (g)	massa imersa (g)	AA (%)	PA (%)	MEA (%)	Resist à Comp (MPa)
Tr1	219,4	250,4	75,5	14,13	17,72	0,19	3,98
Tr1	203,8	234,4	70,8	15,01	18,70	0,21	3,24
Tr1	225,5	252,1	77,8	11,80	15,26	0,15	3,73
Tr1	231,1	261,4	81,1	13,11	16,81	0,16	3,64
Média	219,95	249,575	76,3	13,51	17,12	0,18	3,6475
Desvio Padrão	11,7792	11,2126	4,32743	1,38	1,46	0,03	0,30739
Tr 2	182,3	213,2	44	16,95	18,26	0,39	1,47
Tr 2	177,5	208,7	45,3	17,58	19,09	0,39	1,38
Tr 2	188,3	221,8	48,3	17,79	19,31	0,37	1,08
Tr 2	185,6	217,8	49	17,35	19,08	0,35	1,62
Média	183,8	216,1	47,5333	17,57	19,16	0,37	1,36
Desvio Padrão	5,62049	6,71341	1,96553	0,22	0,13	0,02	0,27055
Tr3	197,9	223,4	60	12,89	15,61	0,21	4,18
Tr3	203,4	230,5	63,2	13,32	16,20	0,21	4,37
Tr3	208,5	233,4	64,5	11,94	14,74	0,19	4,08
Tr3	205,6	231,9	67,5	12,79	16,00	0,19	4,32
Média	203,85	229,8	63,8	12,74	15,64	0,20	4,2375
Desvio Padrão	4,4829	4,4279	3,1080	0,58	0,64	0,01	0,13225
Tr4	201,7	229,6	59,3	13,83	16,38		2,06
Tr4	189,5	218,2	57,6	15,15	17,87	0,26	2,26
Tr4	193,8	218,4	58,1	12,69	15,35	0,22	2,46
Tr4	201,3	228,5	62,5	13,51	16,39	0,22	2,51
Média	194,866	221,7	59,4	13,78	16,53	0,23	2,41
Desvio Padrão	5,9718	5,8898	2,6962	1,25	1,27	0,03	0,13228
Tr5	193,3	221,5	55,6	14,59	17,00	0,26	1,77
Tr5	198,1	227,8	59	14,99	17,59	0,25	1,97
Tr5	193,4	224,8	59,5	16,24	19,00	0,27	2,01
Tr5	223,6	261,1	72,6	16,77	19,89	0,23	2,06
Média	205,0333	237,9	63,7	16,00	18,83	0,25	2,01333
Desvio Padrão	16,25002	20,14770	7,711679	0,91	1,16	0,02	0,045092
Tr6	198,7	228,3	60,7	14,90	17,66	0,25	3,24
Tr6	190,2	219,9	58,4	15,62	18,39	0,27	3,1
Tr6	197,8	228,2	61,7	15,37	18,26	0,25	3,1
Tr6	217,6	247,8	68,3	13,88	16,82	0,20	2,8
Média	201,075	231,05	62,275	14,94	17,78	0,24	3,06
Desvio Padrão	11,6577	11,84018	4,24764	0,77	0,71	0,03	0,18547

Tr7	198,7	229,7	65,2	15,60	18,84	0,24	2,62
Tr7	197,6	227,8	64,3	15,28	18,47	0,24	1,16
Tr7	192,8	221,8	64,3	15,04	18,41	0,23	1,92
Tr7	211,4	242,5	72	14,71	18,24	0,20	2,31
Média	200,125	230,45	66,45	15,16	18,49	0,23	2,0025
Desvio Padrão	7,94119	8,710338	3,72424	0,38	0,25	0,02	0,6304
Tr8	184,9	215,4	56,5	16,50	19,19	0,29	2,06
Tr8	212,4	247,1	64,7	16,34	19,02	0,25	2,01
Tr8	189,9	219,9	57,2	15,80	18,44	0,28	1,97
Tr8	210	246,9	65,3	17,57	20,32	0,27	2,26
Média	199,3	232,325	60,925	16,55	19,24	0,27	2,075
Desvio Padrão	13,9262	17,04472	4,72043	0,74	0,79	0,02	0,1287
Tr9	192,3	225,8	55,2	17,42	19,64	0,32	1,43
Tr9	187,2	220,1	55,7	17,57	20,01	0,32	1,43
Tr9	213	247,6	63,2	16,24	18,76	0,26	2,01
Tr9	198,7	229,4	60,8	15,45	18,21	0,25	1,33
Média	197,8	230,725	58,725	16,67	19,16	0,29	1,55
Desvio Padrão	11,1722	11,8837	3,91184	1,01	0,82	0,03	0,31026
Tr10	193,3	217,3	52,6	12,42	14,57	0,24	1,57
Tr10	210,2	244,1	60,9	16,13	18,50	0,26	1,67
Tr10	193,7	226,4	58,2	16,88	19,44	0,29	1,67
Tr10	216,1	248,4	65,8	14,95	17,69	0,23	1,57
Média	203,325	234,05	59,375	15,09	17,55	0,25	1,62
Desvio Padrão	11,5989	14,6743	5,50416	1,95	2,11	0,03	0,0577

APÊNDICE C

Tabela C.1 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RMCS aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).

Aditivados com SBR								
Traços	Absorção		Porosidade		Massa Espec.		COMPRESSÃO	
	Aparente		Aparente		Aparente			
	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad
TR 6	8,551	0,837	8,983	0,119	0,303	0,038	5,506	0,220
TR 8	6,381	0,632	5,780	0,954	0,378	0,041	4,845	0,177
TR 9	6,459	0,038	6,455	0,176	0,144	0,055	5,6367	0,465

Tabela C.2 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RMCS aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).

Aditivados com PVA								
Traços	Absorção		Porosidade		Massa Espec.		COMPRESSÃO	
	Aparente		Aparente		Aparente			
	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad
TR 6	6,647	0,395	8,337	0,290	0,069	0,001	6,555	0,276
TR 8	4,590	0,068	5,325	0,247	0,059	0,013	5,025	0,306
TR 9	5,085	0,668	5,767	0,437	0,059	0,010	6,410	0,866

Tabela C.3 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RCC aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).

Aditivados com SBR								
Traços	Absorção		Porosidade		Massa Espec.		COMPRESSÃO	
	Aparente		Aparente		Aparente			
	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad
TR 1	20,648	1,088	21,578	1,434	0,165	0,007	5,750	0,508
TR 3	19,253	0,360	20,588	0,620	0,076	0,001	4,620	0,552
TR 6	18,107	2,246	21,274	1,760	0,107	0,018	4,016	0,104

Tabela C.4 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do RCC aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).

Aditivados com PVA								
Traços	Absorção		Porosidade		Massa Espec.		COMPRESSÃO	
	Aparente		Aparente		Aparente			
	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad
TR 1	9,011	1,227	14,713	1,825	0,069	0,006	6,440	0,071
TR 3	5,647	1,211	9,464	1,823	0,043	0,011	5,530	0,170
TR 6	7,329	2,556	12,088	1,411	0,056	0,020	5,030	0,939

APÊNDICE D

Tabela D.1 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo de Minério de cobre sulfetado (RMCS) aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).

Aditivados com SBR								
Traços	Absorção		Porosidade		Massa Espec.		COMPRESSÃO	
	Aparente		Aparente		Aparente		Média	desv
	Média	desv	Média	desv	Média	desv	Média	desv
		pad		pad		pad		pad
TR 6	8,550	0,836	8,982	0,119	0,303	0,0378	5,506	0,220
TR 8	6,380	0,631	5,780	0,954	0,377	0,0413	4,845	0,176
TR 9	6,459	0,038	6,454	0,175	0,144	0,0550	5,636	0,465

Tabela D.2 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo de Minério de cobre sulfetado (RMCS) aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).

Aditivados com PVA								
Traços	Absorção		Porosidade		Massa Espec.		COMPRESSÃO	
	Aparente		Aparente		Aparente		Média	desv
	Média	desv	Média	desv	Média	desv	Média	desv
		pad		pad		pad		pad
TR 6	6,6474	0,3950	8,3371	0,2896	0,0689	0,00121	6,555	0,2758
TR 8	4,5902	0,0683	5,3253	0,2470	0,0585	0,01335	5,025	0,3057
TR 9	5,0854	0,6682	5,7665	0,4366	0,0591	0,01023	6,41	0,8656

Tabela D.3 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo da construção Civil (RCC) aditivadas com Estireno Butadieno (SBR).

Aditivados com SBR								
Traços	Absorção		Porosidade		Massa Espec.		COMPRESSÃO	
	Aparente		Aparente		Aparente		Média	desv
	Média	desv	Média	desv	Média	desv	Média	desv
		pad		pad		pad		pad
TR 1	20,647	1,088	21,578	1,433	0,164	0,006	5,75	0,507
TR 3	19,253	0,360	20,588	0,619	0,075	0,001	4,62	0,551
TR 6	18,107	2,245	21,274	1,759	0,107	0,017	4,016	0,104

Tabela D.4 – Tabela de ensaios experimentais para as argamassas elaboradas a partir do resíduo da construção Civil (RCC) aditivadas com Poliacetato de vinila (PVA).

Aditivados com PVA								
Traços	Absorção Aparente		Porosidade Aparente		Massa Espec. Aparente		COMPRESSÃO	
	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad	Média	desv pad
TR 1	9,010	1,227	14,712	1,824	0,069	0,005	6,44	0,070
TR 3	5,646	1,210	9,463	1,822	0,043	0,011	5,53	0,169
TR 6	7,328	2,556	12,088	1,411	0,056	0,020	5,03	0,938

APÊNDICE E

Tabela E.1 - Modos vibracionais com o número de onda correspondentes.

Número de onda cm^{-1}	Grupo Característico
3550-3200	ν (O-H) OH ...OH
2937-2870	ν C-H dos alcanos
1727-1712	C=O
1650-1630	δ C-H do CH_3
1572	C-O (cristalinidade)
1461-1417	δ CH- CH_2
1376	δ (CH)-R- CH_3
1329	δ (OH)-C-OH
1270	ν_{as} (=C-O-C)
1141	ν (C-O)
1093	ν_{s} (C-O)-C-OH
1023	ν_{s} (=C-O-C)
9456	(C-C)
916	δ (CH)- CH_2
849	ν (C-C)
602	C=O

Associada a Figura E.1 as grandes bandas observadas entre 3550 e 3200 cm^{-1} estão ligados ao alongamento O-H a partir do hidrogênio intermolecular e ligações intermoleculares (região I). A banda vibratória observado entre 2924,90 e 3000 cm^{-1} refere-se ao alongamento C-H a partir de grupos alquilo (região II) e os picos entre 1750 e 1572 cm^{-1} (região III) são devidos ao alongamento de C=O e C-O do grupo acetato pertencente ao PVA.

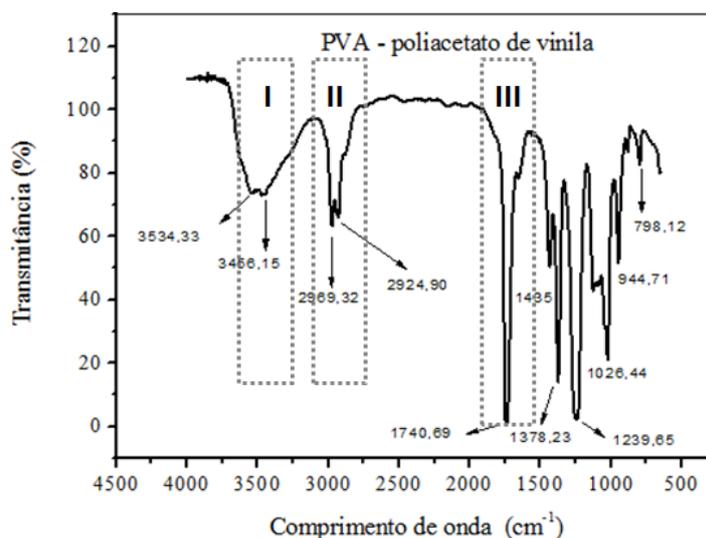


Figura E.1 - Gráfico de FTIR do polímero (PVA).

Associada a Figura E.2 os espectros de FTIR das bandas entre 3700 cm^{-1} e 3200 cm^{-1} da região I são atribuído à vibração de estiramento das moléculas de hidroxilas e da água adsorvida na molécula do polímero (O-H) OH ...OH .Foi observado aspectos vibracionais de alongamento entre $2937\text{-}2870\text{ cm}^{-1}$ região II para os grupos carbono e hidrogênio C-H dos alcanos e vibração de estiramento do radical livre metilo em 2986 cm^{-1} .

Também é observado os picos de absorção em 1503 cm^{-1} e 1554 cm^{-1} da região III que são atribuídos a vibrações de alongamento de moléculas de carbono aromático, o pico de 877 cm^{-1} região III é característico também da vibração de flexão aromática.

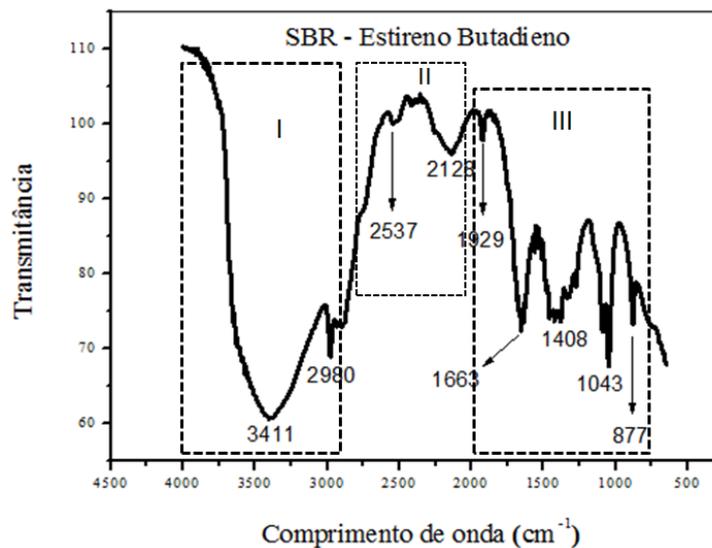
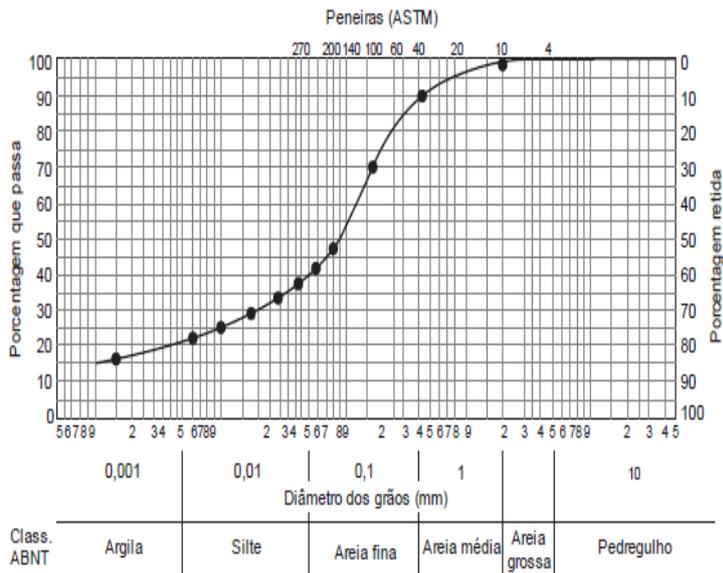


Figura E.2 - Gráfico de FTIR do polímero (SBR).

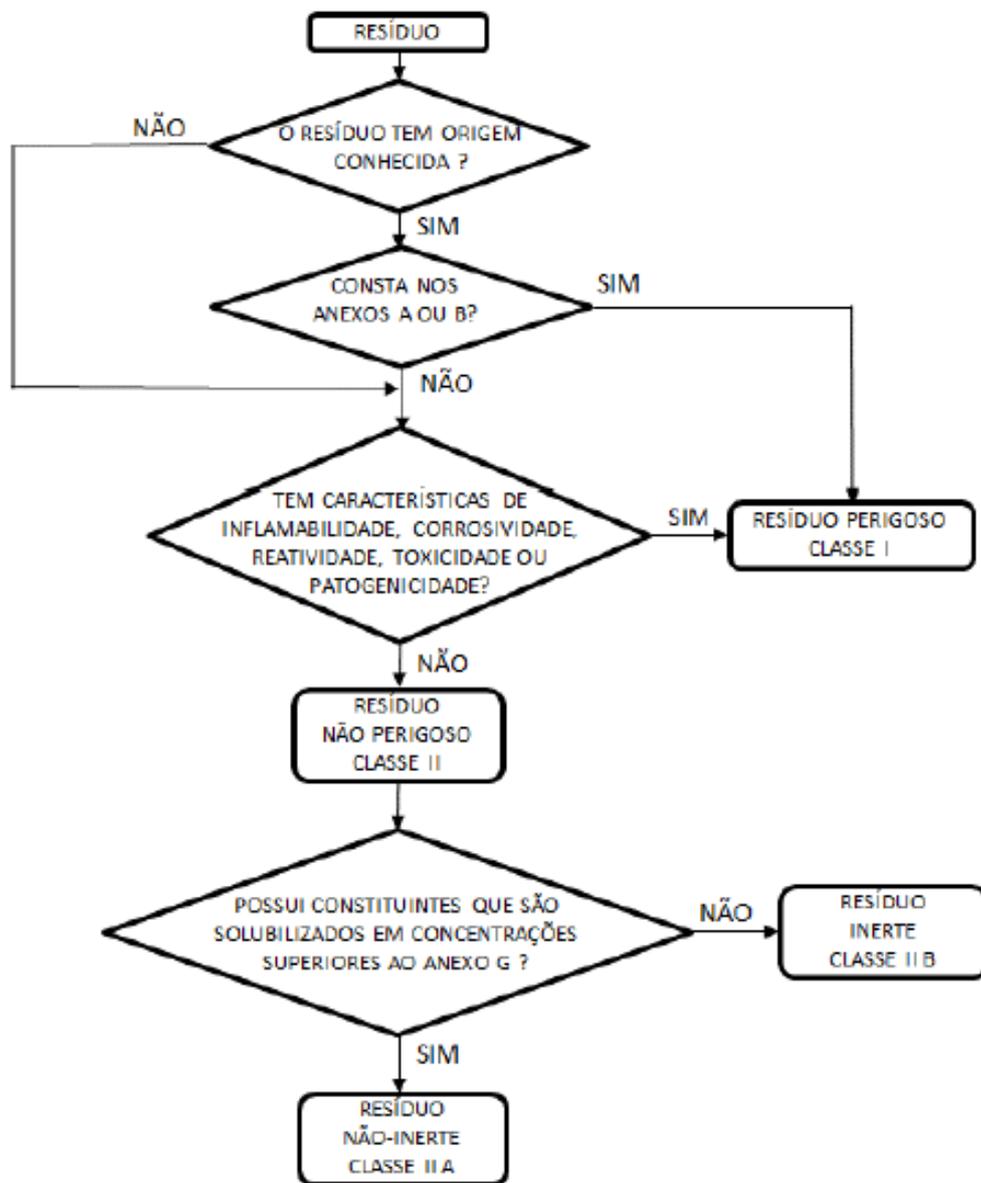
ANEXO 01

Tabela de composição granulométrica de solo fonte: ABNT-NBR6502/1995.

ABNT NBR 6502 (1995)	argila	silte	areia			pedregulho	pedra	matação
	0,002		0,06	0,2	0,6			



ANEXO 02



Fluxograma para a classificação dos resíduos sólidos Fonte: ABNT - NBR 10004/2004.

A NBR 10004 /2004, prevê que os resíduos sólidos gerados pela indústria da construção civil sejam divididos em dois grupos sendo que essa divisão se dá em relação ao potencial do resíduo sólido causar risco a saúde humana e ao meio ambiente:

- Resíduo perigoso (resíduo classe I) – apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade química, toxicidade ou patogenicidade;

- Resíduos não perigosos (resíduos classe II) – estes tipos de resíduos que não apresentam perigo ainda podem ser subdivididos em:
 - Resíduo não – inerte (resíduo classe II – A) – São resíduos que tem alguns de seus constituintes solubilizados em água destilada ou deionizada a temperatura ambiente quando em contato dinâmico ou estático, essas concentrações são superiores aos padrões aceitos pelos padrões de potabilidade da água.
 - Resíduos inertes (classe II-B) – são considerados como qualquer resíduo que não tem seus constituintes solubilizados em água destilada ou deionizada a temperatura ambiente, quando os mesmos entram em contato dinâmico ou estático, não alterando o padrão de potabilidade dessa água.

A resolução estabelecida pelo CONAMA 307 tem como principal objetivo a gestão de resíduos oriundos da indústria da construção civil, e divide os resíduos sólidos em função de seu reuso e valorização, isto é, de seu reaproveitamento direto, ou seja, através de um processo de reciclagem, nesse contexto o resíduo sólido é dividido em 04 diferentes classes:

- Resíduos classe A: são resíduos passíveis de serem reutilizados ou reciclados na forma de agregados para fins estruturais, neste contexto engloba-se os entulhos de construção e materiais de terra planagem.
- Resíduos da classe B: são resíduos passíveis de reciclagem que se destinam a outro tipo de destinação, dentre esses se destacam-se: plástico, vidro, gesso, papel restos de madeira e metais.
- Resíduos da classe C: são resíduos que atualmente não existem tecnologias desenvolvidas para o seu reuso, ou algum tipo de aplicação economicamente viável que viabilizem sua reciclagem.
- Resíduos classe D: Estes tipos de resíduos são considerados perigosos pois são oriundos de construção, dentre esses se destacam-se: solventes orgânicos de tintas, vernizes, tintas, óleos ou materiais contaminados com os mesmos (pinceis, rolos e EPI's), ou produtos que contenham amianto ou outros tipos de substâncias prejudiciais à saúde.