

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RESÍDUO INDUSTRIAL DE VIDRO MOÍDO EM ARGAMASSA DE
CIMENTO PORTLAND

OTÁVIO AUGUSTO PAIVA

MANAUS

2009

RESÍDUO INDUSTRIAL DE VIDRO MOÍDO EM ARGAMASSA DE
CIMENTO PORTLAND

OTÁVIO AUGUSTO PAIVA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração de Materiais.

Orientadores: Francisco dos Santos Rocha
Guilherme Chagas Cordeiro

MANAUS

2009

Ficha Catalográfica

(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Paiva, Otávio Augusto

P149r Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento
Portland / Otávio Augusto Paiva. - Manaus: UFAM, 2009.
208 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade
Federal do Amazonas, 2009.

Orientador: Prof. Dr. Francisco dos Santos Rocha

Co-orientador: Guilherme Chagas Cordeiro

1. Resíduo de vidro moído 2. Argamassa 3. Pozolana I. Rocha,
Francisco dos Santos II. Cordeiro, Guilherme Chagas III.
Universidade Federal do Amazonas IV. Título

CDU 691.542(043.3)

RESÍDUO INDUSTRIAL DE VIDRO MOÍDO EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND

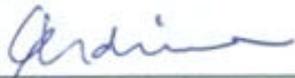
OTÁVIO AUGUSTO PAIVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PESQUISA
E PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC) DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO AMAZONAS COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



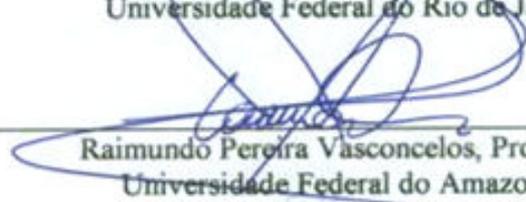
Francisco dos Santos Rocha, Prof. Dr.Sc.
Universidade Federal do Amazonas



Guilherme Chagas Cordeiro, Prof. Dr. Sc.
Universidade Estadual Norte Fluminense.



Romildo Dias Toledo Filho, Prof. Dr. Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Raimundo Pereira Vasconcelos, Prof. Dr. Sc.
Universidade Federal do Amazonas

MANAUS, AM - BRASIL

AGOSTO DE 2009

Dedico este trabalho, principalmente, à minha querida mãe, Lourdes Paiva, e ao meu grande avô, Raimundo Paiva, os quais sempre tiveram esperança e acreditaram no crescimento de minha pessoa, sempre contribuíram para realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha mãe, dona Lourdes do Carmo Ribeiro Paiva, pelos anos de dedicação como mãe, companheira, amiga e, por ser o pilar central de minhas conquistas e me incentivar esses anos todos, além de se sacrificar batalhando sempre para nosso crescimento e melhoria de vida, que tanto deslumbra àqueles que sabem as dificuldades passadas em sua vida;

À Universidade Federal do Amazonas, pelo amparo acadêmico durante a graduação e pós-graduação. Ao laboratório de materiais de construção. Ao laboratório de pavimentação, pelas portas abertas. Ao laboratório de hidráulica e saneamento, pela disponibilidade da estrutura;

Ao meu orientador Francisco dos Santos Rocha, pela confiança depositada, pelo estímulo e impulso, pelas palavras brandas nas horas de tempestade, pelo acompanhamento e lições dadas;

Ao meu co-orientador Guilherme Chagas Cordeiro, pela colaboração, confiança, amizade e ajuda em laboratório;

Ao professor Raimundo Pereira de Vasconcelos, pela confiança e auxílio;

Ao professor Ruy José de Sá, pela paciência e auxílio nas horas questionáveis;

Ao professor e amigo Nilton de Souza Campelo, por ser o vetor da oportunidade de crescimento acadêmico;

Ao professor Romildo Dias Toledo, e também, aos técnicos e servidores do Laboratório de Estruturas – Labest da COPPE/UFRJ e todos os alunos e colegas que lá conheci e convivi;

Ao professor Marcelo Tavares, pelo auxílio e abertura do laboratório de Metalurgia;

À Cíntia Fontes, Reila Maria e Viviam, pela ajuda laboratorial e incentivo, bem como, à Vanessa e Rosana pela companhia diária;

À professora Adriana Maria Coimbra Horbe, pelo auxílio e abertura de das portas do Laboratório de Laminação e Difração de raios X da Faculdade de Geociências;

Aos técnicos de laboratório Zeca, Nelson, Nilson, Jorge, Reinaldo e Ana, por ajudarem em tudo que puderam;

À Fundação de amparo e Apoio à Pesquisa – FAPEAM e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo, que viabilizou minha dedicação exclusiva a realização deste projeto;

Ao Programa de Cooperação Acadêmica – PROCAD, pela oportunidade de aprendizagem e abrir novas perspectivas de crescimento acadêmico.

Ao Instituto Nokia de Desenvolvimento e Tecnologia, pelos equipamentos cedidos à pesquisa;

À empresa Vidros Rio, pelo fornecimento dos resíduos de vidro para pesquisa;

Aos meus amigos que, quando necessitava, estiveram sempre a disposição me incentivando e acreditando em mim, mesmo quando eu já não acreditava mais;

À todos aqueles que comigo conviveram, ajudaram e cresceram conjuntamente;

Aos colegas da Instituição, em especial à Gorett, Karine, Laércio, Tiago, Luciane, Lorival, Caubi, Heraldo, Arlene, Aleixo, Edsandra, pelas horas de descontração e alegria, e que auxiliam na discursão da temática e contribuíram positivamente durante caminho traçado;

À grande amiga Samantha Pinheiro pelo empenho, ajuda prestativa, companheirismo e paciência;

Aos que criticaram e não me incentivaram em nada, pois hoje posso olhar para traz e ver que posso suportar e conseguir superar as dificuldades impostas.

“Não são os mais aptos nem os mais inteligentes os que sobrevivem, mas os que se adaptam melhor às mudanças”.

Charles Darwin

Resumo da Dissertação apresentada à PPGEC/UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil (M.Sc.)

RESÍDUO INDUSTRIAL DE VIDRO MOÍDO EM ARGAMASSA DE CIMENTO
PORTLAND

Otávio Augusto Paiva

Agosto/2009

Orientadores: Francisco dos Santos Rocha
Guilherme Chagas Cordeiro

Programa: Engenharia Civil

O programa experimental realizado no presente projeto foi desenvolvido de forma a avaliar o desempenho do resíduo de vidros planos moídos em pastas e argamassas a base de cimento Portland. Foram estudadas diferentes condições de moagem que possibilitassem a obtenção de um material com partículas da mesma ordem de grandeza das partículas do cimento. O resíduo de vidro moído (RVM) apresentou características físico-químicas compatíveis às da pozolana, com destaque para o índice de atividade pozolânica. Obteve-se valor de 104%, empregando o cimento, que é superior a 75%, prescrito na norma brasileira. O RVM foi aplicado em pastas e argamassas como substituto parcial do cimento, para teores de 0%, 10%, 15%, e 20% em massa, para uma relação água-aglomerante de 0,4. O comportamento do RVM foi avaliado através de ensaios de difração de raios X, análise térmica, resistência à compressão, porosimetria, absorção, permeabilidade, módulo de elasticidade e reação álcali-agregado. Os resultados indicaram que as resistências mecânicas das pastas com RVM alcançaram o valor da resistência de referência a partir dos 28 dias. Nas argamassas foram obtidos resultados satisfatórios de resistência mecânica a partir dos 7 dias, iniciado pelo efeito de preenchimento e, posteriormente, pelo efeito pozolânico que superou os resultados de referência após os 28 dias, principalmente para o teor de 20%. Particularmente, o RVM aumentou a resistência à compressão em 14 e 22% após os 28 e 56 dias de cura, respectivamente.

Palavras-chave: resíduo ultrafino de vidro; argamassa; pasta; pozolana.

Abstract of Dissertation presented to PPGECC/UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science of Civil Engineering (M.Sc.)

INDUSTRIAL RESIDUE OF GROUND GLASS IN MORTAR OF PORTLAND CEMENT

Otávio Augusto Paiva

August/2009

Orienters: Francisco dos Santos Rocha
Guilherme Chagas Cordeiro.

Department: Civil Engineering

The experimental program of the present project was developed in order to evaluate the residue performance of ground plain glasses in cement based paste and mortar. Different conditions of grinding were used to generate a material with particles of the same order of magnitude of the cement particles. The ground glass residue (GGR) displayed physical-chemistry characteristics compatible to the ones of pozzolan, with relevance to the pozzolanic activity index (PAI). PAI equal to 104% was obtained, which is higher than that 75% - minimum value required by the Brazilian standard. The GGR was used in paste and mortar as a partial replacement of cement of 0%, 10%, 15% and 20% in mass, considering a water-binder ratio of 0,4. The GGR behavior was evaluated through the X-Ray diffraction, thermal analysis, compressive strength, modulus of elasticity, porosity, water absorption, and alkali-aggregate reaction. The results did not indicate difference between the mechanical strength of the pastes with GGR and reference mixture after 28 days of curing. In mortars, the results of mechanical strength of the GGR mixtures were adequate from 7 days due to the filler and pozzolanic effects, mainly the 20% GGR mortar. In particular, the GGR provided increasing of compressive strength of 14% and 22% after 28 and 56 days of curing, respectively.

Key-words: ultrafine glass by-product; mortar; paste; pozzolan.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Objetivo geral.....	31
1.2	Objetivos específicos.....	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1	Materiais cimentícios.....	32
2.1.1	Breve evolução histórica do cimento.....	32
2.1.2	Produção e composição do cimento Portland.....	33
2.1.3	Impacto ambiental do cimento	34
2.1.4	Hidratação.....	34
2.1.5	Tipos de cimento	38
2.1.6	Água de amassamento	39
2.1.7	Porosidade da matriz	41
2.2	Adições minerais para materiais cimentícios.....	43
2.2.1	Materiais inertes – Fíleres.....	44
2.2.2	Materiais não inertes – Cimentantes e pozolânicos.....	45
2.3	Argamassas	47
2.3.1	As primeiras argamassas	47
2.3.2	Argamassas hidráulicas e suas propriedades.....	48
2.3.2.1	Trabalhabilidade e consistência.....	49
2.3.2.2	Segregação e exsudação	50
2.3.2.3	Deformação	51
2.3.2.4	Resistência mecânica e módulo de elasticidade.....	51
2.3.2.5	Permeabilidade, porosidade e absorção.....	54
2.4	Resíduo de vidro	55
2.4.1	Resíduos sólidos urbanos e o meio ambiente	55
2.4.2	Produção e utilização do vidro	57
2.4.3	Estrutura do vidro	60
2.4.4	Propriedades	62
2.4.5	Vidro e matriz cimentícia - potencialidades.....	62

3	MATERIAIS CONSTITUINTES EMPREGADOS	67
3.1	Cimento	67
3.2	Superplastificante	68
3.3	Água	69
3.4	Agregados miúdos	69
3.5	Resíduo de vidro	70
4	MÉTODOS EMPREGADOS	72
4.1	Coleta e moagem do resíduo	72
4.1.1	Obtenção do resíduo	72
4.1.2	Processos de moagem do resíduo	74
4.1.3	Moagem ultrafina	76
4.2	Caracterizações do resíduo de vidro moído (RVM)	79
4.2.1	Granulometria à laser	79
4.2.2	Massa específica	81
4.2.3	Composição química	81
4.2.4	Difração de raios X – DRX	82
4.2.5	Atividade pozolânica	85
4.2.6	Superfície específica	87
4.2.7	Microscopia óptica	88
4.2.8	Microscopia eletrônica de varredura - MEV	89
4.2.9	Perda ao fogo	91
4.3	Caracterização do CPI	93
4.3.1	Tamanho de partículas, massa específica, análise química e superfície específica	93
4.3.2	Termogravimetria e análise térmica diferencial	93
4.4	Produção e caracterização de pastas	97
4.4.1	Cone Marsh	98
4.4.2	Dosagem de pastas	99
4.4.3	Difração de raios X das pastas	101
4.4.3	Análise térmica das pastas	102
4.4.4	Ensaio de resistência mecânica	103
4.4.5	Porosimetria por intrusão de mercúrio	104

4.5 Produção e caracterização das argamassas	106
4.5.1 Dosagem das argamassas.....	106
4.5.2 Ensaio Mecânicos	108
4.5.2.1 Módulo de elasticidade das argamassas	109
4.5.3 Absorção de água por imersão e capilaridade	111
4.5.3.1 Absorção total por imersão.....	111
4.5.3.2 Absorção por capilaridade.....	113
4.5.4 Reação álcali-agregado.....	114
5 RESULTADOS OBTIDOS.....	117
5.1 Teor de impurezas orgânicas, materiais pulverulentos e torrões de argila da areia.	117
5.2. Caracterização do cimento Portland comum – CPI.....	118
5.2.1 Análise granulométrica, massa específica e superfície específica.	118
5.2.2 Curvas TG/DTG	119
5.2.3 Difração de raios X.....	120
5.3 Produção e caracterização do resíduo ultrafino de vidro.....	120
5.3.1 Moagem ultrafina - seleção granulométrica	120
5.3.2 Granulometria a laser, massa específica e superfície específica.	122
5.3.3 Microscopia ótica, difração de raios X e composição química.	124
5.3.4 Classificação e índice de atividade pozolânica.....	126
5.4 Produção e caracterização das pastas.....	128
5.4.1 Compatibilidade entre o cimento Portland e o superplastificante e ponto de saturação do superplastificante.	128
5.4.2 Difração de raios X.....	129
5.4.3 Análise termogravimétrica	131
5.4.4 Quantidade quimicamente combinada com o hidróxido de cálcio.....	134
5.4.5 Resistência à compressão	135
5.4.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio	141
5.5 Caracterização das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro	143
5.5.1 Resistência à compressão	143
5.5.2 Módulo de elasticidade.....	148
5.5.3 Absorção total, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade	151

5.5.4 Reação álcali-agregado	156
6 CONCLUSÕES.....	158
7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	160
REFERÊNCIAS	161
APÊNDICE	169
ANEXO.....	198

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cristais de hidróxido de cálcio da microestrutura do cimento formado na zona de transição.....	35
Figura 2 – Cristais de etringita e monossulfato hidratado.	36
Figura 3 – Representação da zona de transição e dos produtos de hidratação da matriz.	37
Figura 4 – Curvas esquemáticas de hidratação do cimento mostrando a taxa de liberação de calor e a concentração de Ca^{2+}	38
Figura 5 – Modelo esquemático dos tipos de água associadas ao C-S-H.	41
Figura 6 – Descrição esquemática da estrutura porosa da pasta de cimento Portland hidratada.	42
Figura 7 – Fatores que influenciam na resistência da matriz cimentícia.....	52
Figura 8 – Parâmetros de influencia do módulo de elasticidade.	53
Figura 9 – Representação do comportamento tensão-deformação sob compressão axial.....	54
Figura 10 – Estrutura molecular: (a) típico de uma estrutura cristalina de quartzo; (b) estrutura de vidro da sílica de vidro; e (c) Estrutura de silicatos de cálcio/sódio.....	61
Figura 11 – Estrutura molecular do vidro com os materiais utilizados como fundentes.....	61
Figura 12 – Deionizador de água do Labest (COPPE/UFRJ).	69
Figura 13 – Curva granulométrica da areia tipo A.	70
Figura 14 – Resíduo de pó de vidro.....	71
Figura 15 – Máquina específica de desbaste e regularização de placas de vidro.....	73
Figura 16 – Câmara de sedimentação do pó de vidro.....	73
Figura 17 – Pó do vidro sedimentado.....	74
Figura 18 – Moagem: (a) máquina de abrasão <i>Los Angeles</i> ; (b) moinho de discos e; (c) pulverizador de rotor.	75
Figura 19 – Moinho planetário: (a) visão geral do equipamento; (b) fixação dos jarros de ágata; (c) corpos moedores e; (d) disposição dos jarros.....	76
Figura 20 – Detalhes da moagem produzida em moinho planetário em tempos distintos: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 20 min; (d) 30 min; (e) 40 min; (f) 60 min; (g) 80 min e; (h) 160 min. ...	78
Figura 21 – Aparelho de granulometria à laser: (a) vista do conjunto e; (b) detalhe da unidade de leitura via úmida.	80

Figura 22 – Aparelho de massa específica à gás: (a) vista geral e; (b) vista frontal com câmara de gás aberta e porta amostra utilizado.....	81
Figura 23 – Espectrômetro de fluorescência de raios x – EDX 720.....	82
Figura 24 – Difração de raios X pela lei de Bragg.....	83
Figura 25 – Equipamento de difração: (a) vista frontal do D8 Focus - Bruker e; (b) detalhe de disposição dos acessórios.....	84
Figura 26 – Preparação para análise de difração de raios X: (a) material utilizado e; (b) cominuição dos grãos.....	85
Figura 27 – Ensaio de índice de atividade pozolânica: (a) corpo de prova com filme plástico, após o desmolde; (b) e (c) acondicionamento em recipiente hermético, envolvido com filme plástico para melhor selagem e; (d) estufa com circulação de ar utilizada.....	86
Figura 28 – Aparelho permeâmetro de Blaine.....	88
Figura 29 – Microscópio estereoscópico SZH10.....	89
Figura 30 – Aparelho MEV JSM – 6460LV (Fonte: http://fap01.if.usp.br/~lff/mev.html).....	90
Figura 31 – Análise no MEV: (a) vidro no filme metálico; (b) porta-amostras cilíndricos; (b) Fixador metálico e; (c) vista interna da câmara do MEV.....	91
Figura 32 – Forno mufla utilizado no ensaio de perda ao fogo.....	92
Figura 33– Amostras do RVM, após o ensaio de perda ao fogo.....	92
Figura 34 – Análise térmica: (a) equipamento SDT Q600; (b) preparo de amostras para ensaio; (c) acessórios utilizados no preparo de amostras e; (d) detalhes do equipamento.....	95
Figura 35 – Ensaio de compatibilidade e teor de saturação pelo cone Marsh.....	99
Figura 36 – Equipamentos: (a) misturador de palhetas Chandler e; (b) materiais utilizados para confecção de pastas.....	100
Figura 37 – Confecção das pastas: (a) medida do espalhamento pelo tronco de cone e; (b) adensamento dos corpos-de-prova no molde e cura em recipiente úmido.....	101
Figura 38 – Confecção das pastas para análise de difração: (a) mistura e coleta das pastas e; (b) amostras curadas no dessecador e prontas para preparação do ensaio.....	102
Figura 39 – Amostras retiradas durante a mistura das pastas para ensaios de análise térmica.....	102
Figura 40 – Prensa servo-hidráulica Shimadzu UH-F1000 kNI.....	103
Figura 41 – Faceamento dos corpos-de-prova de pasta em torno mecânico.....	103
Figura 42 – Produção de corpos-de-prova par ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	105

Figura 43 – Materiais utilizados para cessar a hidratação das amostras dos cubos de pasta produzidos.	106
Figura 44 – Estufa utilizada no processo.	106
Figura 45 – Produção das argamassas: (a) misturador planetário; (b) ensaio e índice de consistência; (c) adensamento de camadas nos moldes com mesa vibratória e (d) câmara úmida para cura dos corpos-de-prova.	108
Figura 46 – Regularização de argamassas para ensaio de resistência à compressão: (a) capela com chapa aquecedora para derreter o enxofre; (b) detalhe da mistura de enxofre e cinzas e; (b) capeamento dos corpos-de-prova.	109
Figura 47 – Ensaio de compressão com aquisição de deslocamento: (a) fixação do corpo-de-prova nos pratos de compressão e; (b) detalhe dos LVDT's e sua fixação no corpo-de-prova.	110
Figura 48 – Ensaio de absorção por imersão total: (a) corpos-de-prova em estufa de 60 °C para constância de massa; (b) imersão total por 72 h; (c) detalhe dos corpos-de-prova imersos; (d) corpos-de-prova levados à ebulição após 72 h imersos; (e) pesagem dos corpos-de-prova imersos após fervura e; (f) pesagem dos corpos-de-prova saturados com superfície seca.	112
Figura 49 – Ensaio de capilaridade: (a) corpo-de-prova selado com fita de alumínio; (b) obtenção da massa do conjunto seco; (c) disposição dos corpos-de-prova no aquário e; (d) detalhe dos corpos-de-prova e lâmina d'água.	114
Figura 50 – Procedimento de leitura da expansão das barras de argamassa.	115
Figura 51 – Solução padrão (à esquerda) e solução com a amostra de areia avaliada (à direita).	117
Figura 52 – Curva granulométrica do cimento Portland Comum.	118
Figura 53 – Curvas TG/DTG do cimento Portland Comum.	119
Figura 54 – Difractograma do cimento Portland Comum.	120
Figura 55 – Curvas granulométricas do resíduo de vidro cominuído em moinho de bolas (curva base) e das amostras moídas por 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80 e 120 minutos.	121
Figura 56 – Curvas granulométricas do resíduo de vidro com 30 minutos de moagem: obtida durante o estudo de moagem (resíduo inicial) e obtida com reprodução da amostra para aplicação (resíduo final).	122
Figura 57 – Comparação entre as curvas granulométricas do resíduo de vidro, cimento Portland e areia A.	124
Figura 58 – Morfologia das partículas de RVM (inicial) com aumento de 350 vezes.	124
Figura 59 – Microscopia ótica do resíduo de vidro com 10x de aumento.	125

Figura 60 – Difratoograma do resíduo de vidro.	125
Figura 61 – Comparações entre índices de atividade pozolânica de aditivos minerais distintos.	128
Figura 62 – Curvas de escoamento em cone Marsh para pastas com diferentes teores de aditivo superplastificante (teor de sólidos).	129
Figura 63 – Difratoogramas das pastas com mesma idade e diversos teores: (a) aos 3 dias; (b) aos 7 dias e; (c) aos 28 dias.	130
Figura 64 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 3 dias de idade.	132
Figura 65 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 7 dias de idade.	132
Figura 66 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 28 dias de idade.	133
Figura 67 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 56 dias de idade.	133
Figura 68 – Quantidade de água quimicamente combinada com o hidróxido de cálcio nas pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.	134
Figura 69– Amostras de pastas rompidas à compressão: (a) referência; (b) substituição 10% de RVM; (c) substituição 15% de RVM e; (d) substituição 20% de RVM.....	135
Figura 70 – Resistência à compressão das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro, agrupados de acordo com o teor de resíduo.	136
Figura 71 – Resistência à compressão das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro, agrupados de acordo com a idade de rompimento.	139
Figura 72 – Distribuição dos tamanhos de poros das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.....	142
Figura 73 – Argamassas rompidas à compressão: (a) referência; (b) subst. 10% de RVM; (c) subst. 15% de RVM e; (d) subst. 20% de RVM.....	144
Figura 74 – Valores de resistência à compressão das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro, agrupados por teor de substituição.	144
Figura 75 – Valores de resistência à compressão das argamassas de cimento Portland com resíduo de vidro, agrupados por idade de rompimento.	146
Figura 76 – Valores de tensão e deformação das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.....	150

Figura 77 – Valores de absorção total, índice de vazios e massa específica das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.....	151
Figura 78 – Valores de absorção capilar das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.....	152
Figura 79 – Absortividade das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.....	155
Figura 80 – Evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina.....	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimento comercializados.	39
Tabela 2 – Impurezas e concentrações na água de amassamento para matriz cimentícia.	40
Tabela 3 – Composição química do vidro comum.	58
Tabela 4 – Índice de reciclagem de vidro no Brasil.	60
Tabela 5 – Propriedades do vidro comum.	62
Tabela 6 - Composição química do CPI.	67
Tabela 7 - Análise físico-mecânica do CPI.	68
Tabela 8 – Características do Glenium 51.	68
Tabela 9 – Características da areia tipo A empregada na argamassa.	70
Tabela 10 - Diâmetros dos grãos de cimento para 10%, 50% e 90 % da amostra, obtidos para os tempos de moagem estipulados e o coeficiente de uniformidade de cada amostra.	121
Tabela 11 - Características do resíduo de vidro produzido para a aplicação nas pastas e argamassas de cimento Portland.	123
Tabela 12 - Composição química (em massa) do resíduo de vidro.	126
Tabela 13 - Parâmetros de classificação de materiais como pozolanas de acordo com a NBR 12653/1993.	127
Tabela 14 – Valores de resistência à compressão e trabalhabilidade das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.	135
Tabela 15 – Ganho de resistência de pastas entre idade inicial (3 dias) e final (28 e 56 dias).	137
Tabela 16 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão, com relação ao teor de substituição do cimento por resíduo de vidro.	137
Tabela 17 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão, com relação a idade de rompimento dos corpos-de-prova.	139
Tabela 18 – Ganho de resistência das pastas entre idades.	141
Tabela 19 – Tamanhos de poros e porosidade das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.	142
Tabela 20 – Valores de resistência à compressão e trabalhabilidade das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.	143

Tabela 21 – Ganho de resistência de argamassas entre idade inicial (3 dias) e final (28 e 56 dias).	143
Tabela 22 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão das argamassas de cimento Portland, com relação ao teor de substituição do cimento por resíduo de vidro.	145
Tabela 23 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão das argamassas de cimento Portland, com relação a idade de rompimento do corpo-de-prova.	147
Tabela 24 – Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.	148
Tabela 25 – Análise comparativa do módulo de elasticidade das argamassas de cimento Portland, segundo a NBR 8522/2003.	149
Tabela 26 – Análise comparativa do módulo de elasticidade das argamassas de cimento Portland, segundo a ASTM.	149
Tabela 27 – Índices físicos das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.	153
Tabela 28 – Análise comparativa na da absorção total das argamassas de cimento Portland.	153
Tabela 29 – Análise comparativa na da índice de vazios das argamassas de cimento Portland.	154
Tabela 30 – Análise comparativa na da absorção por capilaridade das argamassas de cimento Portland.	154

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIVIDRO	Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de vidro
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
A_t	Absorção total;
A_c	Absorção por capilaridade
A_s	Área da seção transversal do corpo-de-prova.
a/ag	Relação água-aglomerante
AsO_3	Trióxido de arsênio
B_2O_3	Óxido de boro
BeO	Óxido de berílio
BaO	Óxido de bário
A	Corrente elétrica (Ampere)
CaO	Óxido de cálcio
C_3S	Silicato tricálcico
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferro-aluminato tetracálcico
$C_6A\check{S}_3H_{32}$	Etringita
$3C_4A\check{S}H_{12}$	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CPI	Cimento Portland Comum
CPS	Contagem por segundo
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CH ou $Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio ou portlandita

CHfi	Porcentagem de massa calcinada da pasta após a decomposição do CH em relação a massa base inicial;
%CHc	Porcentagem de hidróxido de cálcio em relação às respectivas massas bases calcinadas de cimento;
cp	Corpo-de-prova
CO ₂	Dióxido de carbono
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
C ₁₀₀₀	Porcentagem de cimento a 1000 °C
r _p	Raio do poro
d	Distância interplanar
D ₁₀	Diâmetro de 10% da amostra
D ₅₀	Diâmetro médio da amostra
D ₉₀	Diâmetro de 90% da amostra
DRX	Difração de raios X
DTG	Termogravimetria derivada
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
EDX	Espectroscopia de energia dispersiva de raios x
DMC	Diâmetro máximo característico
E	Módulo de elasticidade
E _{ci}	Módulo de elasticidade secante
E _c	Módulo de elasticidade cordal;
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
f _{cp}	Resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com CPI e pozolana;
f _c	Resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com o CPI.
g	Gramas
GeO ₂	Óxido de germânio
hab	Habitantes
h	Hora
I _v	Índice de vazios

IAP	Índice de atividade pozolânica com o cimento Portland.
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
K _i	Constante do aparelho de Blaine
k _v	Coefficiente de condutibilidade térmica
L ou l	Medida de volume – litro
Li	Lítio
Li ₂ O	Óxido de Lítio
min	Minuto
m _{sat}	Massa do corpo-de-prova saturada em água, após fervura (superfície seca)
m _s	Massa do corpo-de-prova seca em estufa
m _i	Massa do corpo-de-prova saturada imersa em água (balança hidrostática)
m _c	Massa do corpo-de-prova após o contato com água durante o período de tempo estipulado
m	Unidade de área – metro
m ²	Unidade de área – metro quadrado
MF	Módulo de finura
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
MnO	Óxido de manganês
m ₁₁₀	Massa da amostra seca em estufa a 110 °C
m ₉₅₀	Massa da amostra calcinada a 950 °C ± 50 °C
M ₁₀₀₀	Porcentagem de massa final da pasta a 1000 °C
M _{ch/mf}	Massa base calcinada de resíduo
M _{cr/ox}	Massa base calcinada de cimento
MC _{ch/mf}	Porcentagem de massa calcinada da pasta após a decomposição do CH
MCr _{ACH}	Porcentagem de amostra antes da decomposição do CH
MCr _{DCH}	Porcentagem de amostra depois da decomposição do CH
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

Na	Sódio
Na ₂ O	Óxido de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
N ₂	Nitrogênio líquido
N	Unidade de força – Nilton
Oc _T	Porcentagem dos óxidos do cimento em relação aos óxidos totais
Oc	Óxidos do cimento
Or	Óxidos do resíduo
ppm	Partes por milhão
P	Pressão externa aplicada
Pa	Pascal
PbO	Óxido de chumbo
PF	Perda ao fogo
P.S.	Ponto de Saturação
PVC	policloreto de vinila
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
q	Ordem de reflexão (numero inteiro)
r _p	Raio do poro
RI	Resíduo insolúvel
%R	Porcentagem de resíduo empregada
Rh	Ródio
rpm	Rotação por minuto
R ₁₀₀₀	Porcentagem de massa do resíduo a 1000 °C
S _e	Superfície específica
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Óxido de enxofre
Sb ₂ O ₃	Óxido de antimônio III
SrO	Óxido de estrôncio
SP	Superplastificante

Si	Silício
s	Medida de tempo – segundos
TG	Termogravimetria
t	Tempo
T	Temperatura
TiO ₂	Óxido de titânio
U	Urânio
V	Tensão elétrica (Volt)
V ₂ O ₅	Pentóxido de vanádio
ZnO	Óxido de zinco
ZrO ₂	Óxido de zircônio

LISTA DE SÍMBOLOS E PREFIXOS

$^{\circ}\text{C}$	Temperatura em Celsius (graus Celsius)
Å	Ångström: unidade de comprimento
λ	Comprimento de ondas dos raios X incidentes
2θ	Ângulo de Bragg
Φ	Ângulo de contato entre o líquido e o sólido
γ	Tensão superficial do líquido
γ_e	Peso específico
Δ	Varição
φ	Ângulo de contato entre líquido e sólido capilar
ρ	Massa específica do material analisado
ω	Porosidade da camada ($\omega=0,500$)
#	Abertura da malha de peneira
η	Viscosidade do ar à temperatura do ensaio.
α	Coefficiente de dilatação linear
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão de compressão
σ_{c1}	Tensão de compressão relativa à deformação de 0,5 MPa;
σ_{c2}	Tensão correspondente à 30% da tensão máxima;
σ_1	Tensão de compressão correspondente à deformação de $5 \cdot 10^{-5}$ milionésimos;
σ_2	Tensão correspondente à 40% da tensão máxima;
ε	Deformação
ε_{c1}	Deformação correspondente σ_{c1} ;
ε_{c2}	Deformação produzida pela σ_{c2}
ε_1	Deformação correspondente a $5 \cdot 10^{-5}$ milionésimos;
ε_2	Deformação produzida pela σ_2 .
ρ_r :	Massa específica real.

ρ_{res} : Massa específica resíduo.
 ρ_{cim} : Massa específica do cimento.

μ Micro (10^{-6})

n Nano (10^{-9})

M Mega (10^6)

m Mili (10^{-3})

c Centi (10^{-2})

k Quilo (10^3)

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com os avanços tecnológicos e o desenvolvimento econômico do setor da construção civil, diversos materiais vêm sendo empregados e alcançam grande destaque pelo emprego em ambientes arrojados e vistosos. Um material bastante empregado nas construções é o vidro.

O vidro é uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substância, a qual, porém, como resultado de uma mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, atingiu um alto grau de viscosidade de modo a ser para todos os fins práticos rígido (MAIA, 2003).

No Brasil a capacidade instalada de vidros planos para a indústria da construção Civil em 2006 era de 1,2 milhões de toneladas. Neste setor o consumo de vidro plano comum representou 57%, o vidro temperado 29 %, espelhado 7%, laminado 5% e metalizado e duplo 1 % cada. Estima-se ainda que apenas 14 % de todo o vidro consumido seja reciclado e que o índice de reciclagem de vidro é de 45 % (ROSA, 2007; ABIVIDRO, 2007; AMBIENTE BRASIL, 2009).

Os vidros utilizados em Manaus são oriundos de indústrias de outras regiões do país, sendo apenas beneficiados no Estado do Amazonas e na região Norte, não havendo reciclagem. Como Manaus é uma cidade que utiliza grande quantidade de vidro na indústria, comércio, edificações e pequenas estruturas, torna-se necessário dar uma destinação final ao resíduo desse material, visando diminuir a degradação ambiental provocada por sua deposição inadequada. Pois, apesar de possuírem a característica de reciclagem contínua, ou seja, o material pode ser reciclado infinitas vezes, são em geral despejados em aterros controlados.

Na região Norte há uma busca, por parte de pesquisadores, de materiais alternativos que possam substituir os agregados e parcialmente o cimento Portland, na confecção de produtos cimentícios, visando manter e/ou melhorar as propriedades das matrizes cimentícias. Além disso, muitas empresas que possuem um sistema de gestão ambiental responsável estão se preocupando com a destinação final do resíduo de vidro, tendo em vista os problemas com a deposição inadequada desse tipo de resíduo por empresas coletoras de entulho contratadas.

Uma opção para o uso de resíduo de vidro, no setor da construção civil, é sua utilização como material alternativo para compor estruturas a base de cimento. Sabe-se que materiais ricos em sílica, como sílica ativa e cinza da casca de arroz, são usados em conjunto com cimento em pastas, argamassas e concretos no intuito de melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade de matrizes cimentícias ((MEHTA e MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 2005; NEVILLE, 1997; CORDEIRO, 2006). Em função de sua composição química rica em sílica, o pó de vidro apresenta-se como uma possibilidade viável para reaproveitar o resíduo oriundo, por exemplo, de placas planas de vidro, do tipo sodo-cálcico, a fim de usá-los como materiais pozolânicos ou fileres. A utilização do pó de vidro, como adição mineral, pode contribuir para diminuir o consumo de cimento ou melhorar a reologia da matriz cimentícia, além de proporcionar uma destinação mais nobre ao resíduo.

Assim, anseia-se com o presente trabalho, oferecer condições para interação entre pequenas empresas de produtos a base de cimento e empresas de beneficiamento de vidro. Com isso, agrega-se valor ao resíduo utilizado por estas empresas, cuja destinação final seria o aterro municipal, contribuindo desta forma para a redução do impacto ambiental negativo ao meio ambiente, além de desenvolver tecnologicamente o ramo da construção civil. Para tanto, foram estipulados os seguintes objetivos para a pesquisa:

1.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização de resíduos de vidro em pó, provenientes de vidros planos sodo-cálcicos em argamassas de cimento Portland, visando agregar valor a esse tipo de resíduo que é disposto de maneira inadequada em aterros sanitários e lixões, prejudicando o meio ambiente.

1.2 Objetivos específicos

- Verificar o desempenho e comportamento do resíduo de vidro moído como adição mineral em matriz cimentícia;
- Analisar as propriedades mecânicas, físico-químicas e microestrutura das incorporações de vidro em compósitos a base de cimento Portland;
- Dar destinação aos vidros inutilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais cimentícios

2.1.1 Breve evolução histórica do cimento

De acordo com Petrucci (2003), a argila foi provavelmente o primeiro material utilizado como aglomerante, segundo alguns textos bíblicos, ela também foi usada em construções pelos assírios e caldeus. Para a produção de tijolos, eram misturados com a argila e matéria orgânica vegetal (palha e gravetos), que forneciam melhor resistência e modificavam a plasticidade do compósito. Os gregos, etruscos e romanos utilizavam a cal aérea como aglomerante, após passar por um processo de calcinação. Em seguida, houve um grande avanço por parte dos gregos e romanos que utilizavam pozolanas naturais em suas construções, as quais eram provenientes de cinzas vulcânicas e se tornavam resistentes à ação da água (KIHARA e CENTURIONE, 2005; SICHIERI *et al.*, 2005).

No século XVIII, o engenheiro Inglês John Smeaton, responsável pela construção do Farol de Eddystone em 1756, realizou vários testes buscando um material que resistisse à ação das águas, com isso, concluiu que calcários impuros com teores de argilas produziam aglomerantes hidráulicos superiores aos de calcários puros. Em 1796, Joseph Parker patenteou um cimento hidráulico que chamou erroneamente de cimento romano, um material obtido da calcinação e moagem de calcário impuro com argila. Desde então, houve uma evolução das argamassas e concretos: L. J. Vicat, em 1818, mostrou que produtos hidráulicos eram obtidos pela mistura e calcinação de carbonato de cálcio com argila (BOUGE, 1995 *apud* KIHARA e CENTURIONE, 2005; SICHIERI *et al.*, 2005; PETRUCCI, 2003).

A obtenção de aglomerantes hidráulicos culminou a partir de 1824 com Joseph Aspdin. Esse engenheiro inglês patenteou a produção de um aglomerante obtido pelo cozimento de misturas de argilas e calcário, tal aglomerante foi chamado de cimento Portland,

devido sua semelhança (quando endurecido) com as rochas calcárias da região de Portland. Daí em diante, com melhorias no processo de produção, a utilização do cimento Portland promoveu o desenvolvimento das argamassas e concretos (KIHARA e CENTURIONE, 2005; SICHIERI *et al.*, 2005).

2.1.2 Produção e composição do cimento Portland

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002), o cimento Portland é um material fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes em presença de água, ou seja, que endurece em contato com a água. As matérias-primas utilizadas na produção de cimento Portland são principalmente o calcário, sílica, alumina e óxido de ferro (KIHARA e CENTURIONE, 2005). Estes interagem entre si, formando diversos produtos complexos. No entanto, como essas matérias-primas, geralmente, se encontram em proporções variadas em rochas ou outros minerais, há necessidade de se realizar uma mistura e homogeneização entre o calcário e a argila, e até adicionar outros minérios, para obtenção de uma combinação adequada (ISAIA, 2005; NEVILLE, 1997). Essa mistura de matérias-primas é levada a um forno rotativo e submetido a elevadas temperaturas. Durante a queima ocorre a formação de pelotas chamadas de clínquer, onde estão sintetizados os compostos de cimento Portland. Seguidamente esse material é moído contíguo ao gesso em granulometria menor que 75 μm para, em seguida, ser embalado.

Existem quatro compostos que são os principais constituintes do cimento, sendo estes: silicato dicálcico (C_2S), silicato tricálcico (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF). Na química do cimento, utilizam-se as seguintes representações: S - SiO_2 ; A - Al_2O_3 ; F - Fe_2O_3 ; M - MgO ; $\bar{\text{S}}$ - SO_3 ; N - Na_2O ; K - K_2O ; C - CaO . Além dos compostos principais, existem outros secundários em porcentagem muito pequena em relação à massa de cimento como o MgO , TiO_2 , MnO_2 , K_2O e Na_2O , porém, de acordo com Neville (1997), deve ser dada atenção especial aos óxidos de sódio e potássio, conhecidos como os principais álcalis do cimento.

2.1.3 Impacto ambiental do cimento

O cimento Portland é o principal ligante hidráulico usado mundialmente para a produção de concretos, argamassas e pastas. A produção mundial de cimento é de 1,5 bilhão de toneladas ao ano e isso requer uma grande quantidade de energia, além de ser o responsável pela emissão de cerca de 7% de CO₂ gerado mundialmente. A produção de uma tonelada do clínquer de cimento Portland lança aproximadamente uma tonelada de CO₂ na atmosfera. Só no Brasil, a produção mensal é de 4,5 milhões de toneladas (Câmara Brasileira da Indústria da Construção – CBIC, 2009), o que significa que o Brasil contribui com a emissão de cerca de 4,5 milhões de toneladas de CO₂. Em meio a esses dados, as indústrias começam a abordar a chamada ecologia industrial, onde se reciclam resíduos de uma indústria para que substituam as matérias-primas de outras de modo a reduzir o impacto ao meio ambiente. Os cimentos compostos são um exemplo de tal ecologia, onde parte do clínquer do cimento é substituído por cinzas volantes e escória. Dessa maneira, a redução na emissão de carbono está associada com a redução do clínquer através utilização das adições minerais no cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Isto mostra a importância de pesquisas de novos materiais para serem usados como aditivos minerais aceitáveis de forma técnica e econômica.

2.1.4 Hidratação

Kihara e Centurione (2005) expõem que o C₃S (alita) é principal constituinte do clínquer, sendo responsável pelo endurecimento e pela resistência mecânica nas idades de 1 a 28 dias de cura. Afirma, também, que o C₂S (belita) é o constituinte responsável pelo ganho de resistência mecânica após os 28 dias. Ambos os compostos originam a produção de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂ ou portlandita) na matriz. Esses silicatos de cálcio hidratados apresentam-se sob forma indefinida, bem irregular e desordenada. O hidróxido de cálcio (portlandita) apresenta-se sob a forma de placas hexagonais cristalinas, como mostra a figura 1 (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

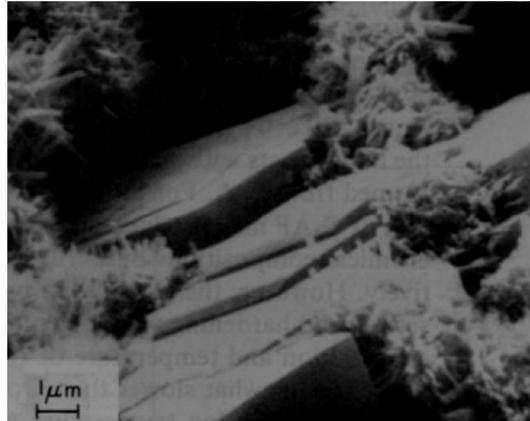


Figura 1 – Cristais de hidróxido de cálcio da microestrutura do cimento formado na zona de transição.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Segundo Neville (1997), para a hidratação dos dois silicatos é necessária uma mesma quantidade de água, porém o C_3S produz mais que o dobro da quantidade de hidróxido de cálcio que o C_2S . Dessa forma, o autor mostra que a partir de cálculos estequiométricos (equações 1 e 2), a hidratação do C_3S produziria 60,5 % de $C_3S_2H_3$ e 39,5 % de hidróxido de cálcio, e o C_2S produziria 81,8 % de $C_3S_2H_3$ e 18,2 % de hidróxido de cálcio. Os silicatos de cálcio (alita e belita) são os compostos principais de resistência de hidratação similar e representam de 75 % a 80 % do cimento (YOUNG *et al.*, 1998).

(1)

(2)

(Silicato de cálcio + água \rightarrow silicato de cálcio hidratado + hidróxido de cálcio)

O C_3A é o composto que proporciona a pega instantânea do cimento, o que é controlado pela adição de gesso. Através de reações provenientes do gesso incorporado na composição do cimento Portland com o C_3A , ocorre a promoção de sulfoaluminatos de cálcio, que se revela como produtos cristalinos na forma de pequenas agulhas prismáticas chamadas de etringita, $C_6A_3H_3_2$ (KIHARA e CENTURIONE, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2008). De acordo com Aïtcin (2000), essa etringita é rica em sulfato e proporciona a formação de

monossulfoaluminato de cálcio hidratado ($3C_4A\bar{S}H_{12}$), se cristaliza na forma placas de hexagonais (figura 2).

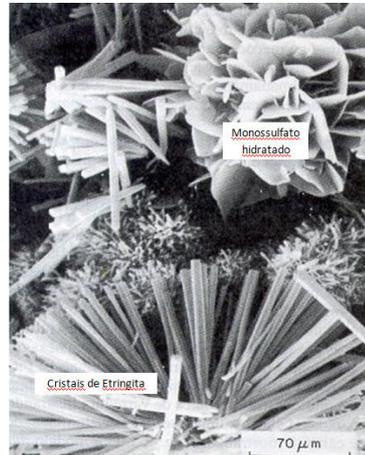


Figura 2 – Cristais de etringita e monossulfato hidratado.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

De acordo com Young *et al.* (1998), as reações para produção da etringita são estáveis enquanto houver gesso suficiente. Quando ocorre a diminuição do gesso, o C_3A reage com a própria etringita, que torna-se instável, formando os monossulfoaluminatos. Essa seqüência de reações podem ser observados através das equações 3 e 4.



(Aluminato tricalcico + gesso + água \rightarrow etringita)



(Etringita + aluminato tricalcico + água \rightarrow monossulfoaluminatos)

O C_4AF (ferrita), basicamente, forma os mesmos produtos das reações do C_3A . Porém, como é pouco reativa, a ferrita combina-se com uma quantidade pequena de gesso e substitui parcialmente o alumínio (Al) pelo ferro (Fe) e tem um papel importante quanto à resistência química do cimento e ataques ácidos. A melhor representação da reação da ferrita com o hidróxido de cálcio, para Young *et al.* (1998), é mostrada na equação 5.



(Ferrita + hidróxido de cálcio + água → aluminato tetracalcico hidratado + hidróxido ferro-aluminato)

O modelo esquemático de representação da pasta de cimento hidratada é mostrado na figura 3, onde se observa as formações dos produtos de hidratação dispostos nas proximidades da zona de transição entre a pasta e o agregado.

A formação dos produtos de hidratação do cimento pode ser notada observando-se a taxa de calor liberada e a concentração de Ca^{2+} em função do tempo de hidratação, estas alterações estão descritas nas curvas da figura 4. No estágio III da curva A ocorre a formação de etringita (trissulfoaluminato), C-S-H e Ca(OH) nas primeiras horas após a mistura da água com o cimento, o que acarreta uma elevação da concentração de Ca^{2+} na curva B. Dias após a confecção da mistura, no estágio IV da curva A, ocorre a transformação do trissulfoaluminato em monossulfoaluminato, esta reação é caracterizada por um aumento repentino da taxa de liberação de calor nesse estágio do tempo de hidratação da pasta de cimento.

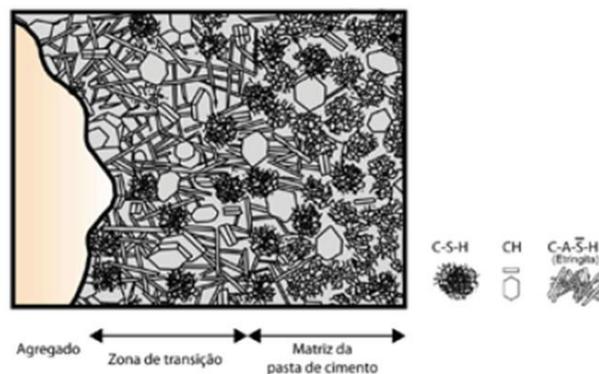


Figura 3 – Representação da zona de transição e dos produtos de hidratação da matriz.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

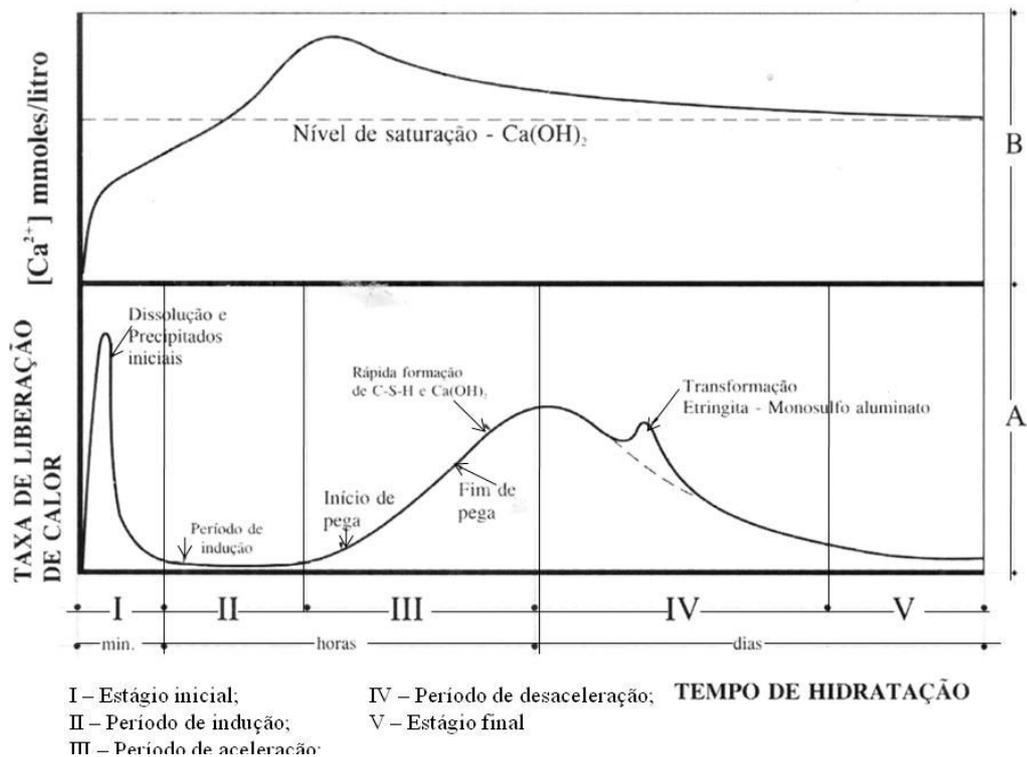


Figura 4 – Curvas esquemáticas de hidratação do cimento mostrando a taxa de liberação de calor e a concentração de Ca^{2+} .

Fonte: Kihara e Centurione (2005).

2.1.5 Tipos de cimento

O cimento é classificado em diferentes tipos que variam conforme sua classe de resistência e componentes de adição para melhoria das propriedades. Atualmente no mercado brasileiro da construção civil, são comercializados treze tipos de cimento Portland (KIHARA e CENTURIONE, 2005), expostos na tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de cimento comercializados.

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classe	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínque + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CPI	25, 32, 40	100	0	0	0
Comum com adição	CPI-S	25, 32, 40	95-99	0	1-5	0
Composto com escória	CPII-E	25, 32, 40	56-94	6-34	0	0-10
Composto com pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	76-94	0	6-14	0-10
Composto com filer	CPII-F	25, 32, 40	90-94	0	0	6-10
Alto forno	CPIII	25, 32, 40	25-65	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25, 32	5-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CPV-ARI	-	95-100	0	0	0-5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	-	-	-	-
Baixo calor de hidratação	BC	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-
Branco não estrutural	CPB	-	-	-	-	-
Poços petrolíferos	CPP	-	-	-	-	-

Fonte: KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1.

2.1.6 Água de amassamento

A água utilizada para a confecção de materiais cimentícios como pastas, argamassas, e concretos é, de uma maneira geral, responsável pela trabalhabilidade da mistura e necessária para iniciar a reação de hidratação dos compostos do cimento. Toda água que seja passível de consumo humano pode ser utilizada na produção de matriz cimentícia (NEVILLE, 1997). Entretanto, é necessário observar que a água usada não deve conter impurezas que venham prejudicar as reações hidratação dos compostos de cimento.

Para melhor visualização dos materiais prejudiciais, Petrucci (1995), através da tabela 2, mostra as indicações quanto às impurezas e sua concentração máxima na água de amassamento.

Tabela 2 – Impurezas e concentrações na água de amassamento para matriz cimentícia.

Impurezas	Concentração máxima tolerável na água de amassamento	
Carbonato e bicarbonato de sódio e potássio	1.000 ppm	(0,1 %)
Cloreto de sódio	20.000 ppm	(2 %)
Sulfato de sódio	10.000 ppm	(1 %)
Bicarbonato de sódio de cálcio e magnésio	400 ppm	(0,04 %)
Cloreto de cálcio	40.000 ppm	(4 %)
Sais de ferro	40.000 ppm	(4 %)
Iodato de sódio, fosfato de sódio, arseniato de sódio e borato de sódio	500 ppm	(0,05 %)
Sulfito de sódio	100 ppm	(0,01 %)
Ácidos inorgânicos, tais como clorídrico, sulfúrico, etc	10.000 ppm	(1 %)
Hidrato de sódio	10.000 ppm	(1 %)
Partículas em suspensão	2.000 ppm	(0,2 %)
Água do mar (sais)	30.000 ppm	(3 %)
Águas industriais (sólidos)	4.000 ppm	(0,4 %)
Águas de esgotos (matéria orgânica)	20 ppm	(0,002 %)
Açúcar	500 ppm	(0,05 %)

Fonte: PETRUCCI, E. G. R. Concreto de Cimento Portland. 5ª. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1995.

Além disso, deve-se observar a quantidade de água utilizada na mistura, pois a adição de água em demasia provoca a diminuição de resistência da matriz. Petrucci (1995) relata que os defeitos provenientes da água de amassamento são, em geral, provocados pelo excesso de água do que pelos elementos que esta possa conter. O autor afirma também que se torna admissível utilizar águas cujo ensaio de resistência da matriz aos 28 dias atinja pelo menos 90 % da obtida com água de qualidade.

De acordo com Mehta e Monteiro, 2008, existe uma classificação da água, que pode existir em muitas formas, como mostra o modelo esquemático da figura 5, e estes tipos são baseadas na sua dificuldade ou facilidade de remoção da pasta de cimento como segue abaixo:

Água capilar: água presente nos vazios maiores que 50 Ångston, sendo subdivida em água livre - quando os vazios apresentam-se de tamanhos maiores que 50 nm e sua remoção não causa variação de volume, o outro tipo é a água retida por tensão capilar, na qual os pequenos capilares possuem tamanhos de 5 a 50 nm, onde sua remoção pode causar retração do sistema.

Água adsorvida: encontrada próxima à superfície dos sólidos da pasta hidratada, sob influência das forças de atração. Na pasta de cimento, a perda desta água é responsável pela sua retração.

Água interlamelar: é a água associada que encontra-se entre as camadas da estrutura do C-S-H fortemente retida pelas pontes de hidrogênio e só é perdida por forte secagem retraindo a estrutura do C-S-H.

Água quimicamente combinada: faz parte da microestrutura dos vários produtos de hidratação e não se perde com a secagem, mas sim quando os produtos hidratados se decompõem.

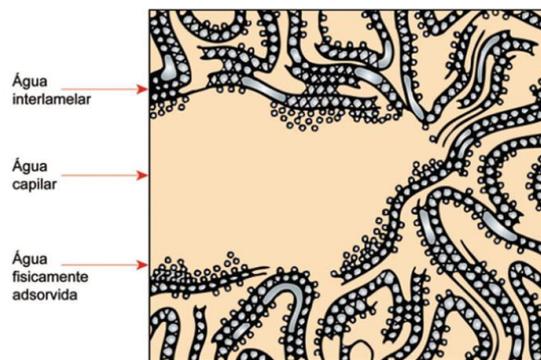


Figura 5 – Modelo esquemático dos tipos de água associadas ao C-S-H.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

2.1.7 Porosidade da matriz

Os produtos formados durante a hidratação do cimento formam uma estrutura porosa que tem grande influência na matriz endurecida e afeta significativamente suas propriedades como a permeabilidade, resistência mecânica, absorção, densidade, etc. (Young *et al*, 1998; Mehta e Monteiro, 2008). Segundo os autores, existem diferentes tipos de vazios na matriz, de acordo com Powers *apud* Young *et al*, os poros podem ser divididos em tipos: poros capilares e poros do gel (figura 6). Este modelo é uma simplificação da atual estrutura porosa das pastas, uma vez que existem uma série de tamanhos de poros.

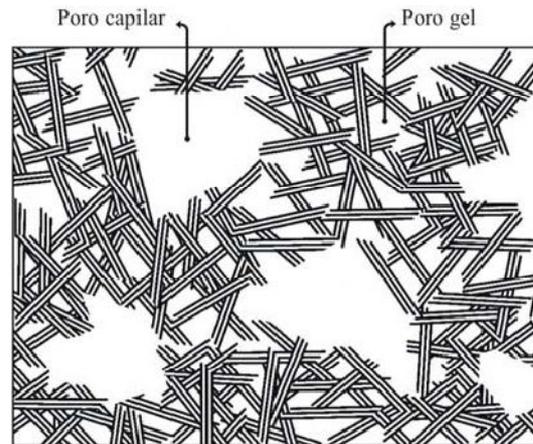


Figura 6 – Descrição esquemática da estrutura porosa da pasta de cimento Portland hidratada.

Fonte: Powers (1958) *apud* Cordeiro (2006).

A distribuição do tamanho de poros é afetada diretamente pela relação água/aglomerante. Os espaços que não são ocupados pelo cimento ou pelos produtos de hidratação consistem de vazios capilares, sendo que o cálculo do volume total desses vazios capilares é conhecido como porosidade. Os poros, com diâmetro maior que 50 nm, possuem maior influência na resistência à compressão e impermeabilidade, enquanto que os poros menores que 50 nm têm influência na retração por secagem e na fluência (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os poros capilares e os poros do gel podem ser subdivididos em classes de acordo com a *International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)* – TAYLOR, 1997 *apud* Cordeiro, 2006, conforme segue abaixo:

- Macroporos: poros com raios maiores que 50 nm (0,05 μm);
- Mesoporos: poros com raios entre 2,0 nm e 50 nm;
- Microporos: poros com raios menores que 2,0 nm (0,002 μm).

2.2 Adições minerais para materiais cimentícios

A utilização de adições minerais é bastante antiga e sua difusão se deu através da execução de várias obras com cinzas vulcânicas na Grécia e no império romano, onde o monte Vesúvio era a principal fonte de cinzas vulcânicas utilizadas (DAL MOLIN, 2005). Atualmente, as adições minerais usadas podem ser naturais ou resíduos, que são subprodutos obtidos de indústrias como as siderúrgicas, agroindústrias, termoelétricas e outras.

As adições minerais são utilizadas para melhorar algumas propriedades do concreto, podendo atuar como pozolanas, cimentantes ou fillers. Silva (2007), diz que o uso de adições minerais pode ser muito vantajoso, uma vez que seu custo é, em geral, menor em comparação ao cimento Portland. Para o autor pode haver uma reação química ou física com os produtos de hidratação do cimento, com modificação da microestrutura, propriedades melhores no estado fresco e endurecido e maior durabilidade. Para Mehta e Monteiro (1994), a destinação aos aterros de subprodutos industriais representa uma perda de material e danos ao meio ambiente, quando bem podiam ser reaproveitados, de maneira adequada, na produção de concreto como agregados ou como aditivos minerais para cimentos de forma a gerar uma economia de energia e custo.

Então, pode-se dizer que as adições minerais são materiais naturais ou subprodutos da indústria e até, segundo Neville (1997), minerais inorgânicos processados, que podem proporcionar ou não alguma reação química proveniente da concepção do endurecimento da matriz cimentícia, e/ou ainda atuar como preenchimento e ponto de nucleação durante a formação e consolidação da zona de transição. No entanto, alguns aditivos minerais requerem uma maior quantidade de água na mistura para se obter uma consistência desejada, fazendo-se necessário o uso de superplastificante. Esse comportamento depende da forma e da superfície específica das partículas do aditivo mineral e da quantidade empregada (KIHARA e CENTURIONE, 2005; DAL MOLIN, 2005). Para Dal Molin (1995) *apud* Cordeiro (2006), a inclusão de aditivo mineral na matriz interfere na movimentação das partículas de água e reduz ou elimina o acúmulo de água livre retida sob o agregado nas misturas.

O aditivo mineral preenche vazios entre as partículas de cimento, gerando aumento da compactação com conseqüente refinamento dos poros, o mesmo efeito não ocorre com a utilização do cimento, pois, em contato com a água, dissolve-se rapidamente para a formação

dos produtos de hidratação (MALHOTRA e MEHTA, 1996 *apud* CORDEIRO, 2006). Outro efeito físico benéfico das adições é o de nucleação heterogênea, pois as reações do clínquer ocorrem na superfície e a área específica efetiva de contato com a água é muito importante para as reações químicas que ocorrem na matriz (CORDEIRO 2006).

De uma maneira geral, todos os materiais encontrados na natureza, de alguma forma, são reativos dependendo do meio onde se encontrem e à medida que consigamos modificar sua estrutura química e/ou física, seja através da utilização de outros tipos de materiais ou elementos químicos específicos ou de processos mecânicos. No que diz respeito à utilização de materiais a base de cimento, nos mantemos envoltos à utilização de materiais empregados conjuntamente com o cimento que reajam benéficamente com alguns de seus produtos de hidratação e não proporcionem reações deletérias ao compósito para a produção de uma mistura cimentícia.

2.2.1 Materiais inertes – Fíleres

São materiais geralmente cristalinos que, quimicamente não reagem ou possuem pouquíssima reação química, principalmente quando usado em conjunto com cimento. São utilizados em concretos e outros artefatos em função de sua finura e forma, proporcionando um melhor empacotamento dos grãos e melhorando algumas de suas propriedades.

Os materiais inertes utilizados como adição mineral em concretos são bastante conhecidos como fíleres. Estes materiais podem ser naturais ou minerais inorgânicos, de acordo com Neville (1997), que devem ser finamente moídos, com finura semelhante ao do cimento Portland. Em geral, estes materiais não reagem quimicamente com os produtos derivados do cimento, mas possuem um efeito de preenchimento proporcionando a densificação da pasta, atuando nas propriedades do concreto fresco e na durabilidade do compósito. Além produzir um efeito benéfico sobre a densidade, permeabilidade, capilaridade, porosidade, absorção, exsudação e fissuração.

Além disso, de acordo com Dal Molin (2005), o filer não só preenche os vazios dos poros presentes no concreto e minimiza a exsudação, mas também diminui o acúmulo de água livre depositada sob os agregados reduzindo a espessura da zona de transição e age como

ponto de nucleação, ou seja, quando o mineral é inserido na matriz, este se deposita em poros gerados na mistura, próximos à superfície dos agregados, fortalecendo a zona de transição, propiciando desorientação de cristais de hidróxido de cálcio e diminuindo seu tamanho, tal efeito é chamado de microflier. No entanto, para obtenção desse tipo de efeito, que propicia a densificação da matriz, o diâmetro médio das partículas de adição mineral deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento.

Alguns materiais como o calcário, pó de quartzo e pó de pedra, são exemplos típicos de materiais que agem como fillers. Porém, atualmente são realizadas diversas pesquisas no intuito de buscar novos materiais alternativos que satisfaçam o mesmo papel.

2.2.2 Materiais não inertes – Cimentantes e pozolânicos

Os materiais reativos são aqueles que possuem propriedades cimentantes ou pozolânicas, através de reação química, com algum constituinte necessário na produção ou consolidação do concreto. Os materiais cimentantes necessitam de água para sua hidratação e, segundo Dal Molin (2005), não possuem necessidade do hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 – para gerar produtos cimentantes como C-S-H, porém a hidratação ocorre de maneira lenta e suas propriedades são insuficientes para aplicações estruturais. A escória de alto-forno e cinzas volantes com alto teor de cálcio são exemplos de materiais cimentantes.

Os materiais pozolânicos, segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992), são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si sós, possui pouca ou nenhuma propriedade aglomerante, mas, quando estes são finamente divididos e em presença de umidade, reagem com o hidróxido de cálcio, liberado pelo cimento na presença de água, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades aglomerantes. Esses materiais pozolânicos podem ser naturais ou artificiais. Não obstante, Mehta e Monteiro (1994) informam que reação pozolânica ocorre pela reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, levando a formação de novos silicatos de cálcio hidratados adicionais, como mostra a equação 6.



(Hidróxido de cálcio + pozolanas ricas em sílica + água → silicato de cálcio hidratado)

Alguns tipos de pozolanas e suas características, de acordo com Mehta e Monteiro (1994), Dal Molin (2005) e Neville (1997) são descritas a seguir:

- Cinzas volantes com baixo teor de cálcio: pozolanas oriundas de queima de carvão, arrastada por gases de combustão, composta principalmente de sílica, alumínio, ferro, com a maioria das partículas esféricas, amorfas e menores que 45 μm e com superfície específica de 300 a 700 m^2/kg (adsorção de nitrogênio);
- Sílica ativa: pozolana conhecida como fumo de sílica ou microsílica é um subproduto da indústria de ferro-silício e silício-metálico, é constituída de sílica pura onde o monóxido de silício condensa e se oxida em contato com o ar formando o dióxido de silício de partículas esféricas muito pequenas com partículas médias de 0,1 μm e amorfas. Possui superfície específica média em torno de 20.000 m^2/kg (adsorção de nitrogênio);
- Metacaulim: obtido pela calcinação de argilas cauliníticas e caulins à temperaturas de 600 $^{\circ}\text{C}$ a 900 $^{\circ}\text{C}$, extremamente finas e altos teores de material amorfo rico em sílica e alumínio;
- Cinza da casca e arroz: oriunda da combustão da casca de arroz pelas indústrias beneficiadoras e de indústrias geradoras de energia térmica, obtendo-se assim, cinzas amorfas de alta pozolanicidade e rica em sílica. Possui geralmente partículas menores que 45 μm e superfície específica de 220 a 260 m^2/kg .

Além destes materiais, temos ainda os vidros vulcânicos e os tufos vulcânicos que são utilizados como pozolanas (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Outros materiais estão sendo estudados por possuírem potencialidades pozolânicas como tijolos moídos (GONÇALVES, 2005; TOLEDO FILHO, *et al.*, 2007) e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CORDEIRO, 2001).

Em geral os materiais pozolânicos possuem uma estrutura amorfa ou vítrea sem regularidade espacial ou ordenamento em seu arranjo atômico e, segundo Cascudo (2007), o

amorfismo, de uma maneira geral, refere-se a uma estrutura interna sem forma e quando este conceito é aplicado em materiais com diversidade de configurações atômicas, pode-se dizer que são amorfos os materiais como gases, líquidos e os sólidos não-cristalinos como o vidro.

2.3 Argamassas

2.3.1 As primeiras argamassas

As primeiras argamassas conhecidas, segundo Alvarez *et al.* (2005), foram descobertas na Galileia, há mais de 10.000 anos. Os autores relatam ainda que a utilização de cal e gesso em construções de pisos e paredes, bem como, em estátuas, foram realizadas em Jericó de 8.000 a 7.000 a.C. Tal material era utilizado, em mesma época, também, na Turquia como reboco de paredes. Mas em Jerusalém foi onde se encontrou as argamassas hidráulicas, trabalhadas pelas mãos de fenícios, na construção de cisternas.

Os povos antiguidade já conheciam o processo de fabricação da cal, a qual era utilizada para junção de alvenaria e em rebocos pintados, conforme Lea (1970) *apud* Kihara e Centurione (2005). Os próprios egípcios utilizavam argamassas de cal aérea e gesso na construção das pirâmides. Com o passar dos tempos, o processo de obtenção da cal se desenvolveu com a melhoria de fornos e novos métodos de extinção da cal, principalmente pelos romanos. Em construções gregas, especificamente em ilhas que não eram providas de jazidas de mármore, os materiais utilizados para a construção eram terras de origem vulcânicas, originadas da erupção do vulcão Tera da ilha de Santorini, adicionadas às argamassas de cal e areia, que melhoravam a resistência da argamassa, mesmo em presença de água. De mesma maneira os romanos faziam suas edificações, porém com terras vulcânicas da baía de Nápoles, originadas do vulcão Vesúvio. Porém, a excelente qualidade do concreto romano se destacava pelo uso de outro material, conhecido como pozolanas artificiais como pedras vulcânicas, argilas calcinadas, além de uma pozolana natural, adicionada à argamassa

para construções de obras que necessitavam do contato com água, esse material natural era proveniente da cidade de Pozzuoli - da qual deriva seu nome (ISAIA, 2005).

Segundo Alvarez *et al.* (2005), os romanos eram os primeiros conhecedores da técnica de modificação da argamassa de cal com adições de silicatos e aluminatos, tanto que, em estudos realizados, a Roma popular era dita frágil e fora construída apenas com cal. Porém os romanos utilizavam, em obras públicas, argamassas com adições de pozolânicas, o que melhorava as características das construções podendo realizar grandes obras e que se destacam até os dias atuais chamadas de “arquitetura romana”. Sabe-se hoje que os romanos utilizavam cerca de 240 tipos de aditivos orgânicos para melhoria das argamassas produzidas.

John Smeaton estudou o fenômeno de hidraulicidade das argamassas, e em 1756 construiu o Farol de Eddystone, onde realizou vários testes buscando um material que resistisse à ação das águas, com isso, concluindo que calcários impuros com teores de argilas produziam aglomerantes hidráulicos superiores aos de calcários puros. A partir daí houve uma evolução das argamassas e concretos, o que culminou em 1824, quando Joseph Aspdin patenteou o chamado de cimento Portland, promovendo um enorme salto na evolução das argamassas e concretos (PETRUCCI, 2003).

2.3.2 Argamassas hidráulicas e suas propriedades

Atualmente a argamassa hidráulica é definida como uma mistura de um ou mais materiais aglomerantes (geralmente cimento) e agregados miúdos (geralmente areia), que em proporções adequadas e em presença de água constituem uma massa densa, coesa e resistente amplamente utilizada na indústria da construção civil. Este tipo de material possui diversas aplicações como rejuntamento, revestimento, piso, injeções e recuperação estrutural (PETRUCCI, 2003). Além disso, de acordo com a quantidade de aglomerantes utilizados em sua produção, as argamassas podem ser classificadas em:

- Simples: quando em sua produção é utilizado apenas um tipo de aglomerante;
- Composta: quando há a utilização de mais de um tipo de aglomerante.

Existem ainda, outros tipos de classificação referenciados de acordo com a dosagem (pobres, cheias e ricas), tipo de aglomerante (aéreas, hidráulicas e mistas) e segundo sua consistência (secas, plásticas e fluidas).

A obtenção de uma argamassa de boa qualidade, dependendo de sua finalidade de trabalho, deve consistir de boa resistência mecânica, compacidade, impermeabilidade, porosidade, aderência, constância de volume e durabilidade. Todavia, essas propriedades estão ligadas à qualidade e quantidade dos materiais utilizados para a produção das mesmas, segundo sua aplicação.

A argamassa é influenciada pelas características adquiridas no estado fresco, o que traz um reflexo na mistura em estado endurecido quanto a resistência mecânica e propriedades físicas. Assim, torna-se fundamental que durante a produção, o comportamento no estado fresco seja observado.

2.3.2.1 Trabalhabilidade e consistência

Neville (1997) e Mehta e Monteiro (1994) expressam que a trabalhabilidade é de importância essencial e deve ser atendida para obtenção de uma mistura que possibilite um adensamento, com compacidade máxima gerada pela energia aplicada. A trabalhabilidade é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular certa quantidade da mistura com uma perda mínima de homogeneidade (ASTM C 125 - 93 *apud* MEHTA e MONTEIRO, 1994, P.348). A trabalhabilidade é expressa, por Neville (1997), em virtude da energia utilizada para o adensamento da matriz (sendo essa energia uma medida do trabalho aplicado para vencer o atrito interno – intrínseca da mistura – e o atrito superficial), sendo assim, pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil para produzir o adensamento pleno. A trabalhabilidade possui como componentes principais a consistência (conhecida como a firmeza de forma, índice de fluidez ou mobilidade) e coesão (conhecida como resistência à segregação).

São diversos os fatores que afetam a trabalhabilidade, entre eles: teor de água na mistura, o consumo de cimento, características do agregado, aditivos incorporados, relação

água/cimento, relação agregado/cimento e adições minerais, ou seja, todos os componentes da mistura.

2.3.2.2 Segregação e exsudação

Neville (1997) e Mehta e Monteiro (1994) apresentam a mesma definição de segregação, esta nada mais é do que, a perda de união dos componentes da matriz, deixando a mesma sem uma distribuição uniforme dos constituintes. Os autores ainda enfatizam os tipos de segregação que podem ocorrer no concreto. A primeira é a segregação proporcionada por misturas pobres e secas, acarretando a separação dos agregados maiores da massa da matriz em superfícies inclinadas ou sedimentação dos agregados graúdos em maior quantidade do que os agregados de granulometria menor. Deve-se salientar ainda que, as principais causas da segregação estão relacionadas com características granulométricas (tamanho, massa específica e distribuição granulométrica). Outra forma de segregação ocorre pelo excesso de água na mistura, o que a torna muito fluida, acarretando a separação da pasta da matriz cimentícia.

Uma forma de evitar a segregação é realizar misturas mais coesivas, para isso, se faz o uso, geralmente, do aumento da quantidade de cimento, aditivos, incorporadores de ar e adições minerais. Em uma definição ampla de diversos autores como Neville (1997), Mehta e Monteiro (1994), bem como de Petrucci (1995), a exsudação é a separação da água da mistura, que tende a migrar para a superfície devido o adensamento e a incapacidade dos materiais sólidos constituintes de reterem água da matriz, quando estes tendem a sedimentar. Por essa razão, Neville (1997) diz que a exsudação é uma forma de segregação.

Durante o processo de exsudação, quando a água migra para a superfície, parte da mesma fica acumulada na parte inferior de armaduras e dos agregados, gerando falta de aderência nestas regiões. Segundo Neville (1997), isso também aumenta a permeabilidade da mistura no plano horizontal. A exsudação provoca a queda de resistência em estruturas, geralmente altas, pois ocorre que, a água se desloca da parte inferior, promovendo uma menor relação água/cimento e uma maior resistência, para a superior onde ocorre o contrário. Quando a água migra para a parte superior, ela pode carregar as partículas finas de cimento

criando uma camada de nata porosa e fraca, que pode prejudicar a aderência com outra camada.

A exsudação decresce quando a argamassa começa seu processo de enrijecimento. O fenômeno pode ser controlado com o aumento da quantidade de cimento, com o aumento da finura do mesmo, aumento da quantidade de C_3A (provocando rápida perda de consistência), utilização de aditivos e com o uso de proporções de agregados ou adições minerais finas adequadas.

2.3.2.3 Deformação

As deformações são variações de volume de concreto e argamassas decorrentes das condições ambientais e das solicitações aplicadas às peças, gerando fissuras. Vários outros fatores influenciam as deformações como o tipo de cimento, agregados, ambiente, etc.

2.3.2.4 Resistência mecânica e módulo de elasticidade.

A resistência mecânica é tida como a propriedade mais importante da matriz cimentícia, embora a durabilidade e a permeabilidade, muitas vezes sejam mais relevantes (NEVILLE, 1997). Mehta e Monteiro (1994) definem resistência como a capacidade do material resistir à tensão de ruptura, podendo ou não gerar fissuras. Várias outras propriedades do concreto são relacionadas e condicionadas à resistência, podendo ser deduzidas dos dados da mesma (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os concretos ou argamassas, via de regra, são submetidos a um conjunto de tensões em uma ou mais direções, porém, para execução em laboratório determina-se o ensaio padrão amplamente reconhecido como resistência à compressão uniaxial (MEHTA e MONTEIRO, 1994). As reações entre o cimento e a água continuam mesmo após o endurecimento da matriz, sendo comumente estabelecido como padrão, a aquisição da resistência com idade de 28 dias, mas em geral, efetua-se também o rompimento com 3 e 7 dias para analisar as condições do concreto com mais rapidez.

Os concretos e argamassas são materiais bastante resistentes aos esforços de compressão, o que não pode ser dito quanto à atuação dos esforços de tração, sua resistência à tração é cerca de 10 % da resistência à compressão (PETRUCCI, 1995). O autor ainda faz referência à resistência à flexão, onde diz que seu valor assumido é cerca do dobro de sua resistência à tração simples.

A resistência à compressão é uma característica fundamental na determinação da utilização e trabalho de estruturas, porém, é importante o conhecimento sobre a resistência à tração, mesmo que esta seja desprezada para cálculos, pois cumpre um papel importante nas informações para efeito de estudos e características sobre fissuração, deformação, esforço cortante e outros. Um dos métodos utilizados para determinar a resistência à tração do concreto é a tração por compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos, conhecido como o método brasileiro.

São diversos os fatores que afetam a resistência do concreto (figura 9) como: idade da matriz, tipo de cimento, relação água/cimento, relação agregado/cimento, aditivos, granulometria, forma e tamanho dos grãos, forma e dimensão do corpo-de-prova, duração e velocidade da carga, porosidade, entre outros.

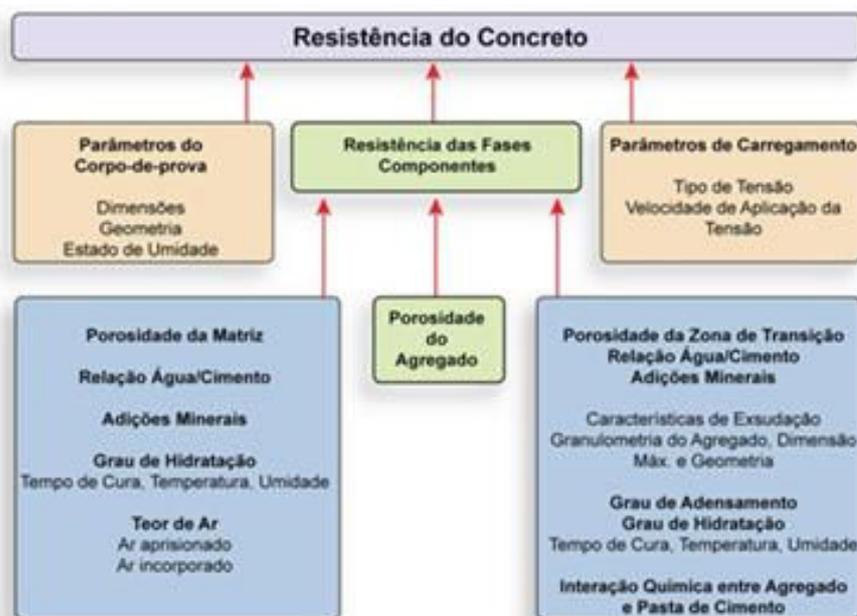


Figura 7 – Fatores que influenciam na resistência da matriz cimentícia.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

As deformações no concreto e argamassas que causam a fissuração, normalmente ocorrem pela ação de um carregamento externo. A matriz não é um material elástico e nem as deformações e as restrições são uniformes. As distribuições das tensões variam de um ponto a outro, por isso é importante conhecer as propriedades elásticas dos materiais e os fatores que as afetam como mostra a figura 10.



Figura 8 – Parâmetros de influencia do módulo de elasticidade.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

As deformações provenientes da ação de uma carga instantânea mostram não ser diretamente proporcional à tensão aplicada e, não é totalmente recuperada quando ocorre o descarregamento da carga aplicada. Assim, ocorre vários estágios de fissuração, a medida que uma dada tensão é aplicada (figura 11).

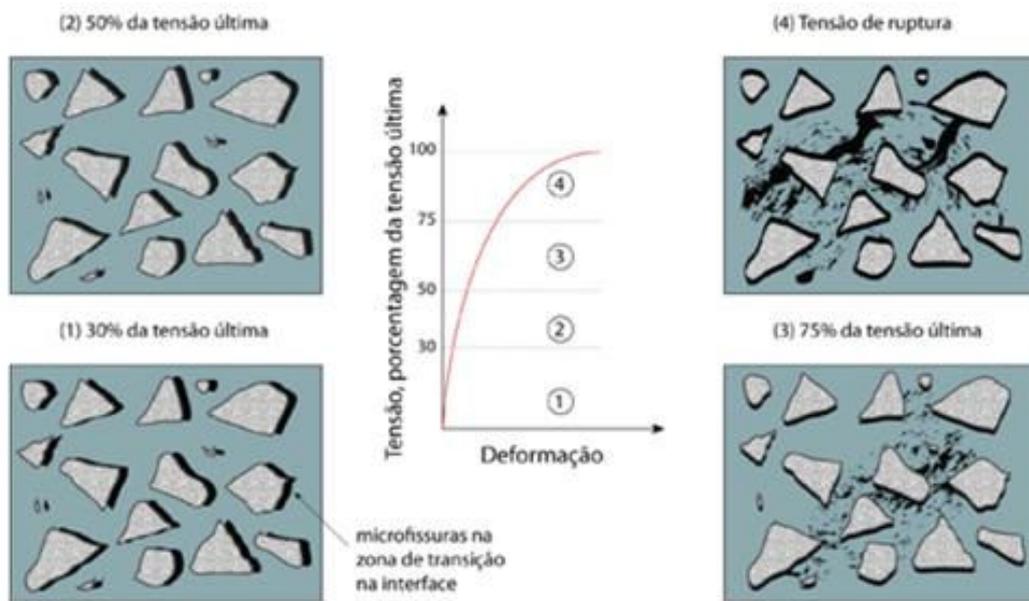


Figura 9 – Representação do comportamento tensão-deformação sob compressão axial.

Fonte: Glucklich (1968) *apud* Mehta e Monteiro (2008).

2.3.2.5 Permeabilidade, porosidade e absorção

Permeabilidade é o escoamento sob diferencial de pressão (NEVILLE, 1997) ou, como define Mehta e Monteiro (1994), é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Sabe-se que a argamassa é um material poroso e isso deve-se ao fato de que durante o processo de produção é necessária a adição de água em demasia, além da necessária para a hidratação do cimento para se obter uma mistura trabalhável. Dessa forma, a mistura oferece uma quantidade de água evaporável e, aliada ao ar incorporado, gera uma grande quantidade de poros, com ou sem interconexão entre eles que, segundo Paulon (2005), são considerados como parte integrante da matriz e são encontrados em diversos tamanhos, sendo seu estudo de grande relevância na microestrutura da mistura.

O sistema de distribuição de poros é influenciado pela dosagem, cura, quantidade e tipos de adições minerais e aditivos químicos. Isso afeta diretamente a resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade da matriz (PAULON, 2005). Se a porosidade for grande e interconectada, esses poros contribuem para o fluxo de fluidos, aumentando, assim, a permeabilidade do material.

Segundo Petrucci (1995), a permeabilidade se dá por meio da capilaridade, filtração sob pressão e por difusão de condutores capilares. Mehta e Monteiro (1994) descrevem que, em concreto e argamassas, a introdução de agregados com permeabilidade baixa, deveria diminuir a permeabilidade do conjunto, o que não acontece devido às microfissuras presentes na zona de transição. A resistência da zona de transição sofre influência de diversos fatores como o tamanho do agregado, que diretamente afetam a exsudação, a retração, etc.

Já a absorção é o processo que retém água nos poros por condutos capilares (PETRUCCI, 1995), sendo esta uma medida do volume de poros. Todo concreto ou argamassa é permeável, pois a pasta e os agregados possuem uma rede capilar que se comunicam entre si e o meio externo, permitindo a entrada de água em ambientes molhados ou úmidos (ANDRADE, 2005). A absorção é geralmente utilizada para controle de pré-moldados e é determinada por simples ensaio de imersão e afeta diretamente as propriedades do concreto, como resistência e durabilidade, pois a maior ou menor presença de água no sistema pode contribuir para as reações de degradação como fluorescência, possibilidade de carbonatação e lixiviação da mistura.

2.4 Resíduo de vidro

2.4.1 Resíduos sólidos urbanos e o meio ambiente

O crescimento industrial em todo o mundo vem acompanhado de avanços tecnológicos e científicos que visam melhorar a qualidade de vida da população em geral. Uma das conseqüências desse processo é a geração de resíduos dos mais variados tipos, danosos ou não ao meio ambiente e à vida da população (BARDINI, 2007; JOHN, 2000). Atualmente, a maioria dos países vem manifestando uma preocupação muito grande com a degradação do meio ambiente causada por agentes, tais como queimadas de florestas, despejo

industrial e outros que geram mudanças climáticas, aumento do buraco na camada de ozônio, etc.

A grande demanda de produtos industriais gera resíduos desde o processo de fabricação de determinados bens até o descarte destes pelos consumidores. Alguns produtos fabricados constituem fonte renovável, o que favoreceu o crescimento da reciclagem de resíduos. Porém, é notório que os materiais gerados na indústria são em quantidade bem maior que a capacidade das empresas de reciclagem. Além do mais, o processo de coleta, separação e transporte de muitos produtos leva a aumentos de custos, o que pode inviabilizar a reciclagem.

Sendo assim, as grandes disposições de resíduos industriais vêm estimulando pesquisas, no sentido do aproveitamento destes materiais e de sua destinação final. No Brasil, pesquisas na área da engenharia civil, de materiais e de minas vêm sendo desenvolvidas para aproveitamento de resíduos oriundos de pneus, massas cerâmicas, fumo de sílica, restos de demolição e outros (GONÇALVES, 2005; BARATA, 2008; ANGULO, 2005). Em geral, esses materiais são adicionados à matriz cimentícia, aproveitando o encapsulamento do compósito. Assim, o resíduo é reutilizado, diminuindo a poluição do meio ambiente bem como a quantidade de lixo destinado aos aterros. De acordo com Prado (2007), no Brasil são coletados diariamente cerca de 120 mil toneladas de lixo por dia e 80% desse material é depositado em lixões, sendo que o resíduo de vidro corresponde a 3% do resíduo urbano gerado.

A classificação dos resíduos sólidos segundo seu potencial de risco ao meio ambiente e à saúde da população é realizada através da NBR 10004 (ABNT, 2004), segundo a qual define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (NBR 10004/2004).

A NBR 10004 classifica os resíduos como sendo:

- Classe I – resíduos perigosos: resíduos que apresentam periculosidade em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas apresentam risco à saúde pública, provocando mortalidade, doença ou que contribuam para estes índices, além de, oferecer riscos ao meio ambiente ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II A – resíduos não perigosos e não inertes: aqueles que não se enquadram na classe I nem na classe II B e apresentam propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- Classe II B – resíduos não perigosos e inertes: resíduos que quando submetidos ao contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excluindo o aspecto de cor, dureza, turbidez e sabor, conforme o anexo G desta norma.

Com base nos critérios fornecidos acima, os resíduos de vidros planos são classificados como sendo de classe II B – não perigosos e inertes, o que facilita o manuseio durante processos de separação, coleta e reciclagem do resíduo.

2.4.2 Produção e utilização do vidro

A produção de vidro é bastante antiga e sua descoberta ainda é um mistério, segundo a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO (2008), o historiador romano Plínio atribuiu a descoberta acidental aos fenícios, sendo que sua utilização já era utilizada por egípcios, sírios, assírios, babilônicos, gregos e romanos. Segundo os pesquisadores as peças de vidro mais antigas são provenientes do Egito (5000 a.C.). O primeiro grande desenvolvimento da indústria do vidro ocorreu por volta de 250 a.C., na Síria com a descoberta do método de produção de vidro por sopro (MAIA, 2003). Em escavações, realizadas em Bagdá, foram encontrados artefatos de vidro que datam 2700 a.C. Desde então, a técnica de produção do vidro começou a ser aperfeiçoada e difundida. Sua

composição básica de elementos utilizados não mudou muito em relação os dias atuais, porém sua utilização é ampla e se desenvolve em diversos setores de produtos (ABIVIDRO, 2008).

Segundo Maia (2003), a palavra vidro refere-se aos sólidos amorfos, que ao se fundirem tornam-se líquidos viscosos e que ao serem resfriados se solidificam sem cristalizar, o autor define vidro como: “uma substancia inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substancia, a qual, porém como resultado de uma mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, atingiu um alto grau de viscosidade de modo a ser para todos os fins práticos rígido.”

Desta forma, pode-se dizer que os vidros são substâncias inorgânicas e amorfas, provenientes do resfriamento de uma massa sílica em fusão (SICHERI, CARAM e SANTOS, 2007). De acordo com a ABIVIDRO (2008), a composição química do vidro é semelhante à de materiais que compõem a crosta terrestre como mostra a tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do vidro comum.

Óxido	% na crosta	% no vidro
SiO ₂ (sílica)	60	74
Al ₂ O ₃ (alumina)	15	2
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	7	0,1
CaO (cálcio)	5	9
MgO (magnésio)	3	2
Na ₂ O (sódio)	4	12
K ₂ O (potássio)	3	1

Fonte: ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO - ABIVIDRO. **Vidros**. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br>>. Acesso em: dez. 2007

Dependendo do uso, as quantidades e os tipos de produtos utilizados para fabricação do vidro pode ter suas propriedades químicas modificadas, porém com quantidade de sílica sempre elevada. São produzidos atualmente três tipos básicos de vidro: o sodo-cálcico, boro-silicato e o de chumbo. Existem mais de 200 empresas de produção de vidro atuando hoje no mercado brasileiro de vidro, entretanto, apenas 24 encontram-se totalmente automatizadas

(ABIVIDRO, 2008). ROSA *et al.* (2007) afirmam que o mercado de vidro é voltado para o consumo interno e a oferta industrial é de domínio de poucas empresas.

O vidro é de grande utilização na construção civil, devido suas características de durabilidade, transparência, dureza, impermeabilidade e também por ser um material 100% reciclável (SICHERI, CARAM e SANTOS, 2007). No panorama internacional, só em 2005 foram consumidos cerca de 41 milhões de toneladas (5 bilhões de m²) de vidros planos, sendo que, a construção civil respondeu por 70% das vendas, a indústria automobilística teve 10% e o setor moveleiro associado com outros consumidores adquiriram 20% das vendas (ROSA *et al.*, 2007). O autor ainda afirma que dos vidros destinados à construção civil, 40% foram destinados à novas construções, 40% à reformas de moradias e 20% para utensílios de interiores. A estimativa de crescimento da demanda de vidros planos até 2010 é de cerca de 4% ao ano.

No Brasil, em 2006, a capacidade instalada para produção de vidros sodo-cálcicos para os vários setores das atividades industriais (construção, automóvel, móveis, alimentos, bebidas, etc.) é de 3,1 milhões de toneladas, entretanto cerca de 2,6 milhões de toneladas de vidro foram vendidos. Os vidros sodo-cálcicos como os vidros planos, de embalagens e de uso doméstico, representam 90% desta capacidade instalada. Só os vidros planos possuem 1,240 milhão de toneladas de capacidade instalada em 2006 e o vidro float comum detém 57% do consumo na construção civil (ROSA *et al.*, 2007).

Segundo a ABIVIDRO (2007), apenas 45% dos vidros produzidos na própria indústria são reciclados, o que equivale a cerca de 1.395 mil t/ano. De acordo com os dados da empresa Ambiente Brasil (2009), o país recicla apenas 14, 2% dos vidros consumidos. Para Rosa *et al.*, o consumo *per capita* do vidro no Brasil é de 12 kg/hab/ano.

No contexto urbano da cidade de Manaus, com base na composição gravimétrica do lixo realizada por Stroski (2002), a quantidade de vidro despejada no aterro é de 138,08 ton/semana oriundos de o lixo domiciliar e 18,63 ton/semana do Distrito Industrial de Manaus. As edificações apresentam em sua composição arquitetônica uma grande quantidade de vidro em fachadas, boxes para banheiros, portas, janelas, letreiros, paradas de ônibus e peças para móveis.

De maneira geral, a grande produção de vidro, as demolição, reformas e mesmo as reposições de componentes de vidro formam, anualmente, uma quantidade apreciável de

resíduo vítreo, embora o índice de reciclagem do vidro (tabela 4) tenha crescido muito durante os anos de 1991 a 2005, grande parte do material é desperdiçado.

Tabela 4 – Índice de reciclagem de vidro no Brasil.

Ano	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Material reciclado	15%	18%	25%	33%	35%	37%	39%	40%	40%	41%	42%	44%	45%	45%	45%

Fonte: ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO - ABIVIDRO. **Vidros**. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br>>. Acesso em: dez. 2007.

2.4.3 Estrutura do vidro

Devido a grande semelhança entre os cristais e o vidro no que se refere à dureza, transparência, condutividade térmica e outras propriedades, e mais, que é necessário relativamente pouca energia para converter um cristal em vidro, podemos concluir que as ligações que existem no vidro são iguais às ligações das estruturas cristalinas dos silicatos. A diferença é que na estrutura cristalina, cada tetraedro tem uma posição determinada, repetitiva e simétrica e no caso do vidro esta estrutura é desordenada e não repetitiva e varia de acordo com a história térmica do vidro, ou seja, na velocidade em que se deu o resfriamento do vidro quando passou de líquido para sólido.

De acordo com Callister (2002), o vidro é pertencente ao grupo familiar dos materiais cerâmicos, e formados por dióxido de silício, sendo silicatos não-cristalinos possuindo, assim, uma estrutura molecular sem arranjo regular, de acordo com a ilustração da figura 7.

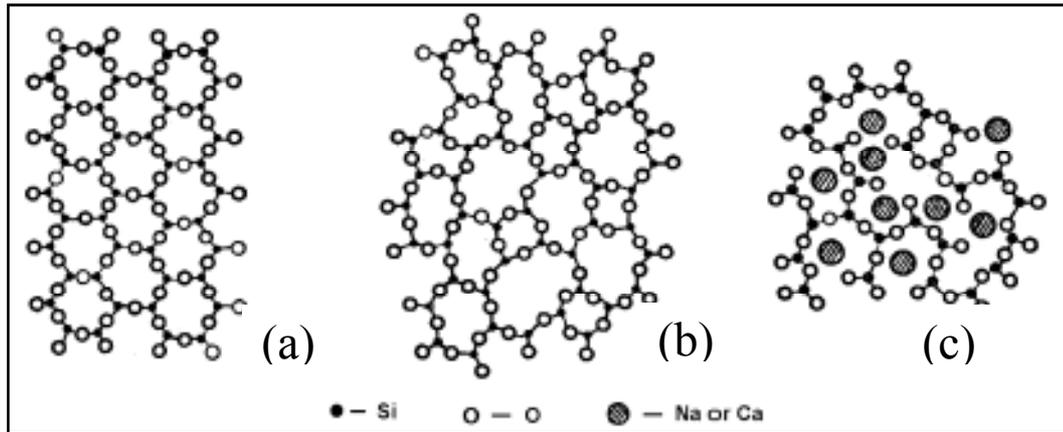


Figura 10 – Estrutura molecular: (a) típico de uma estrutura cristalina de quartzo; (b) estrutura de vidro da sílica de vidro; e (c) Estrutura de silicatos de cálcio/sódio.

Fonte: DIN (1979) *apud* SHI e ZHENG (2007).

Os óxidos comumente encontrados na composição do vidro são classificados em vidro-formadores (B_2O_3 , SiO_3 , GeO_2 , P_2O_5 , V_2O_5 e AsO_3), intermediários (Al_2O_3 , Sb_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , PbO , BeO , ZnO) e modificadores (MgO , Li_2O , BaO , CaO , SrO , Na_2O e K_2O). Quanto a função desses óxidos no processo de fabricação do vidro a classificação é feita em vidro-formadores, estabilizadores, fluxos ou fundentes e acessórios. Os fundentes têm a função de baixar a temperatura de fusão da mistura das matérias-primas, porém proporcionam resistência química precária o que faz necessária a adição de óxidos estabilizadores. Entre os fundentes empregados pode-se citar o NaO_2 , CaO , AlO_3 , LiO_2 e KO_2 , a estrutura molecular do vidro com fundentes está mostrada na figura 8 (MAIA, 2003).

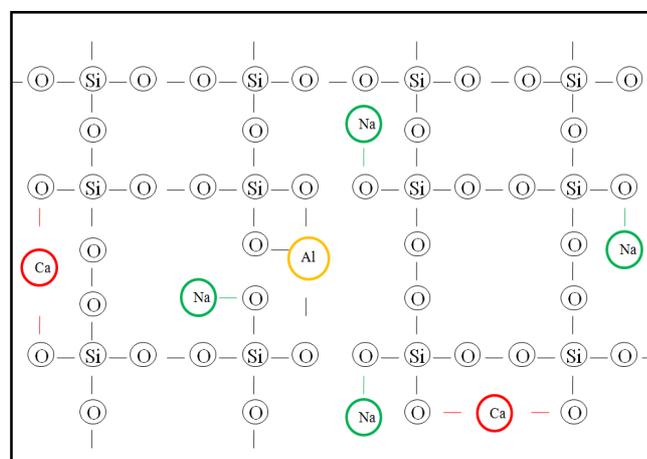


Figura 11 – Estrutura molecular do vidro com os materiais utilizados como fundentes.

2.4.4 Propriedades

Bauer (1994) e Petrucci (2003) mostram algumas propriedades dos vidros comuns ou recozidos, sendo que outros tipos de vidro, em geral, apresentam algumas propriedades físicas e mecânicas semelhantes, tais como segue na tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades do vidro comum.

Propriedade	Grandeza
Coefficiente de condutibilidade térmica a 20 °C (k_v)	0,8 a 1 kcal/m.h.
Coefficiente de dilatação linear (α)	$9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Coefficiente de Poisson (ν)	0,22
Calor específico (C)	0,19 kcal/kg °C
Dureza	6 a 7
Módulo de elasticidade (E)	75.000 MPa
Peso específico (γ_v)	2.500 kgf/m ³
Tensão de ruptura à flexão	40 MPa
Tensão de compressão	400 MPa

Fonte: PETRUCCI, E. G. R. Concreto de Cimento Portland. 5ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1995.

2.4.5 Vidro e matriz cimentícia - potencialidades

As adições minerais influenciam na resistência e porosidade da matriz cimentícia melhorando a resistência e as propriedades do concreto. O uso de adições minerais em concreto melhora o comportamento da matriz no estado fresco e endurecido, como densidade resistência a compressão, exsudação, segregação e trabalhabilidade.

Atualmente, diversas pesquisas em matriz cimentícia vêm sendo realizadas com resíduos de materiais de uso industrial e agroindustrial com potencial pozolânico, ou apenas de preenchimento, visando melhoria em suas propriedades de concretos, menor consumo de cimento e diminuição dos impactos no meio ambiente (FONTES, 2008; CORDEIRO, 2006; LIMA, 2009; LIBÓRIO *et al.*, 2005; TASHIMA, 2006). Dessa forma, o uso de materiais sintéticos torna-se uma fonte constante de estudos, o que vem ensejando pesquisas de materiais alternativos para a utilização em concretos, o que pode proporcionar uma melhor racionalização no uso de recursos naturais.

Tendo em vista que, o vidro é um material feito com uma massa de sílica em fusão, dessa maneira pode-se verificar que, ao final de seu processo de produção, o vidro apresenta-se como um material composto de sílica amorfa. Sendo o resíduo de vidro classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004) como um resíduo de classe II B, tido como não perigoso e inerte. A presença desse tipo de sílica amorfa em sua composição faz do vidro um material com potencialidade para promoção de pozolanicidade, quando apresentar alto grau de finura.

Alguns estudos vêm sendo realizados por alguns pesquisadores para utilização de resíduos de vidro como substituto parcial e total de agregados, como filler e como substituto parcial do cimento (TOPÇU e CAMBAZ, 2004; POLLEY *et al.*, 1998; LÓPEZ *et al.*, 2005; SHAO *et al.*, 1998). Meyer e Xi (1999) estudaram maneiras de usar resíduos de vidro quebrados como agregado em concreto, nessa linha de pesquisa o objetivo básico e prioritário era resolver os problemas causados pela reação álcali-sílica (RAS). De acordo com Meyer e Xi (1999), o vidro tem influencia na expansão devido a reação álcali-silica, uma vez que a RAS é um fenômeno claramente dependente da área superficial, sendo esperado que a expansão aumente monotonicamente com a finura do agregado. Contudo, existe um tamanho de agregado onde ocorrem as maiores expansões, devido às reações álcali agregado, chamado tamanho “péssimo”. Em geral, este tamanho depende da composição e estrutura do vidro, entretanto, segundo os autores, para vidros sodo-cálcicos normais, esse tamanho “péssimo” é em torno da abertura das malhas das peneiras 1,2 mm (peneira #16) e 0,6 mm (peneira #30). Para agregados mais finos, outro processo que não dependente da área superficial torna-se predominante e as expansões decrescem com elevadas finuras. Os autores não observaram quaisquer expansões quando o vidro utilizado foi moído em tamanhos menores que 0,30 mm (peneira 50), o que os levaram a conclusão de que o aumento das expansões da RAS crescem com a elevação da finura das partículas de vidro até certo ponto, a partir daí, essas expansões decrescem.

Outros autores como Corinaldesi *et al.* (2005) *apud* Shi e Zheng (2007), que estudaram as propriedades mecânicas e a microestrutura de argamassas com substituição da areia fina por 30 a 70% de resíduo de vidro, afirmam que partículas com tamanho de até 100 μm não causam efeitos deletérios a nível macroscópico, mas melhoram a performance mecânica devido aos efeitos positivos nas propriedades micro-estruturais.

Na Universidade de Wisconsin-Medison, Polley *et al.* (1998), utilizaram resíduos de vidros, com granulometria entre 0,075 e 1,5 mm, como substituto de agregados finos em uma variedade de misturas. Neste estudo, cinzas volantes foram utilizadas em conjunto para conter a reação álcali-agregado (RAA). Os resultados foram expressivos com a utilização de 20% de substituição do agregado miúdo por agregado de vidro. O autor ressalta a importância de se investigar a complexidade pozolânica e outras reações entre a pasta de cimento, cinza volante e resíduo de vidro com partículas menores que 0,075 mm.

Topçu e Cambaz (2004) utilizaram resíduos de garrafas de refrigerantes, com grão de 4 a 16 mm, como substituto nas porcentagens de 0, 15, 30, 45 e 60 % da pedra calcária em concretos, além de verificar a reação alcali-silica (RAS) em barras de argamassa com 0, 25, 50, 75 e 100% de substituição do agregado. Os autores verificaram que o aumento da quantidade de vidro diminuiu o peso específico da mistura. Os agregados proporcionaram uma RAS mais lenta e podem ser utilizados no concreto.

López *et al.* (2005) utilizaram vidro moído na faixa granulométrica de 0,15 a 0,30 mm, como adição e substituição do agregado miúdo em porcentagens de 5, 10, 15 e 20% (sobre o peso do agregado). Segundo os autores, a melhor proporção foi de 5% (adição), levando ao aumento da resistência à compressão, pois, a mediada que a quantidade de vidro aumentava, aumentavam também a absorção e o índice de vazios, enquanto houve queda na massa específica. A resistência da mistura se elevou, conforme os graduais aumentos de substituição do agregado miúdo por vidro moído, sendo observada, de maneira contrária à adição, uma diminuição da absorção e índice de vazios, além do aumento da massa específica.

Para Meyer (1996) *apud* Shao *et al.* (1998), partículas de vidro menores ou iguais a 300 μm , reduzem a expansão da RAS. Em suas pesquisas no Canadá, Shao *et al.* (1998), utilizaram vidros moídos do tipo sodo-cálcicos, limitando-se apenas aos vidros provenientes de lâmpadas fluorescentes (vidros cálcicos), separados em três granulometrias: com 150 μm , 75 μm e 38 μm . Em seus ensaios, verificaram a resistência, a atividade pozolânica e a RAS. Assim, obteve altas resistências, elevados índices de atividade pozolânica e redução das

expansões da RAS, principalmente com o resíduo de tamanho igual a 75 μm . Além disso, os resíduos de 75 μm e 38 μm mostraram índices de atividades superiores aos da cinza volante.

Dyer e Dhir (2001), buscando uma destinação para a grande quantidade de vidros sodo-cálcicos oriundos de garrafas de vinho e cerveja no Reino Unido, efetuaram um estudo a fim de avaliar as reações químicas de vidro nas cores verde, âmbar e branco, como componentes do cimento. Os autores trabalharam com os resíduos moídos com partículas menores que 600 μm , pois segundo Meyer e Xi (1999) *apud* Dier e Dhir (2001), os tamanhos “péssimos” para o vidro encontram-se de 1200 a 600 μm . Pastas e argamassas foram feitas para ensaios específicos com substituições parciais do cimento em 0, 10, 20, 30 e 40%, dessa forma, obtiveram resistências satisfatórias aos 28 dias, principalmente com a proporção de 10% do vidro de cor verde e branco, que proporcionou resistência acima da matriz de referência. Já os vidros de cor âmbar, a substituição de até 20% se mostra compatível com a referência. Os autores informam ainda que, com a substituição de 10% e 20% aos 28 dias, houve diminuição da quantidade de portlandita e aumento da resistência à compressão, o que certamente foi resultado de reações pozolânicas.

No ensaio de RAS, outros autores mostram que os resíduos de vidros de ambas as cores proporcionaram uma diminuição da expansão, principalmente os resíduos da cor verde. O que mostram as pesquisas realizadas é o fato das expansões, devido a RAS, tornarem os agregados de vidro mais vulneráveis à medida que o tamanho dos mesmos aumenta (MEYER *et al.*, 2001).

Shi *et al.* (2005), analisaram a morfologia, finura e atividade pozolânica de pós de vidro obtidos por quatro tipos de processos. Dessa maneira, observaram que quanto menor é o tamanho das partículas maior é a atividade e que, temperaturas têm maior influência sobre a atividade pozolânica do pó de vidro do que nas cinzas volantes. Por conseguinte, quando os vidros são finamente divididos, reduzem as expansões provocadas por RAA. Estudos semelhantes aos relatados foram realizados em pastas de cimento por Karamberi e Moutsatsou (2005), que efetuaram a substituição de 25% do cimento por vidros sodo-cálcicos coloridos da região da Grécia, detectando reações do vidro com o cimento na produção de C-S-H e, para eles, os pós de vidro não ofereceram expansões devido à RAS.

A procura por uma destinação desses resíduos vem deixando visível a importância das pesquisas que lhe são conferidas. Não obstante a isso, um estudo realizado por Chen *et al.* (2002) contribui significativamente, pois em Hong Kong analisou os diversos tipos de vidro

utilizados na cidade e encontrou cerca de 32 tipos das mais variadas composições. Alguns desses diferem das composições específicas para determinados vidros expostos na literatura. Os autores introduziram resíduos de vidro na produção de cimento, obtendo um produto sem qualquer impacto significativo da composição química do cimento gerado, apesar do aumento da quantidade de produtos alcalinos.

Em meio à realidade local e os dados anteriormente fornecidos, há de se justificar a utilização dos vidros como componente de uma matriz cimentícia pela disponibilidade do material, pois, como se mostrou, apenas cerca de 14% do vidro no Brasil é reciclado. Quando esse material se torna inutilizável, é apenas coletado e enviado ao aterro da cidade, prejudicando o processo de percolação do chorume e a decomposição de outros materiais, pois o vidro leva cerca de 2 mil a 1 milhão de anos para se decompor (SANTOS *apud* BARDINI, 2007, p. 20). Ao passo que, o material é essencialmente composto por sílica amorfa e outros componentes que podem vir a melhorar a durabilidade da matriz como adição mineral pelo seu potencial pozolânico.

Tudo isso estimula a procura de uma alternativa viável para destinação final do resíduo que, além de contribuir para a diminuição do impacto causado pelo despejo no meio ambiente, possa ter uma aplicação mais nobre na indústria da construção. Como o vidro é um material composto essencialmente de sílica, deve-se tomar bastante cuidado na análise da reação álcali-agregado, em especial a reação álcali-silica, uma vez que, a grande quantidade de sílica pode reagir com os álcalis do cimento gerando um gel que sofre expansão na presença de água, com danos ao concreto.

3 MATERIAIS CONSTITUINTES EMPREGADOS

3.1 Cimento

Como o objetivo deste trabalho foi incorporar um material com as características de filer ou pozolana, buscou-se trabalhar com um cimento sem adição, uma vez que, um cimento composto poderia minimizar a porcentagem de adição a ser realizada. Assim, na presente pesquisa, utilizou-se o cimento Portland comum CPI – 32, atualmente comercializado em Manaus. Suas características químicas e físico-mecânicas são apresentadas nas tabelas 6 e 7, respectivamente (dados fornecidos pela fábrica de cimento).

Tabela 6 - Composição química do CPI.

Análise química		(%)
Dióxido de silício	SiO ₂	20,11
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	5,46
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	2,67
Óxido de cálcio	CaO	64,35
Óxido de magnésio	MgO	1,19
Anidro sulfúrico	SO ₃	2,99
Óxido de potássio	K ₂ O	0,57
Óxido de sódio	Na ₂ O	0,29
Perda ao fogo	P.F.	2,98
Resíduo insolúvel	R.I.	1,49
Equivalente alcalino	0,658 x %K ₂ O % Na ₂ O	0,66
	C ₃ S	60,09
	C ₂ S	12,35
Compostos	C ₃ A	9,94
	C ₄ AF	8,14

Fonte: Cement Curacao Plant – Quality Control, Cimento Amazonas, 2008.

Tabela 7 - Análise físico-mecânica do CPI

Análise físico-mecânica		
Finura # 90 µm (%)		98
Finura # 45 µm (%)		80,12
Blaine (m ² /kg)		333,8
Massa específica (g/cm ³)		-
Expansibilidade	Quente	-
Tempo de pega (minuto)	início	85
	Fim	140
Resistência a compressão por idade (MPa)	3 dias	24,01
	7 dias	33,87
	28 dias	41,45

Fonte: Cement Curacao Plant – Quality Control, Cimento Amazonas, 2008.

3.2 Superplastificante

A obtenção de uma mesma consistência e relação água/cimento se faz necessária para comparação da resistência de diferentes misturas, diminuindo assim, a quantidade de variáveis manipuladas. Para essa finalidade, o uso de superplastificante é muito importante. O aditivo químico utilizado na pesquisa foi o Superplastificante de terceira geração Glenium 51 da BASF, com propriedades descritas na tabela 8.

Tabela 8 – Características do Glenium 51.

Função	Base química	Aspecto	Cor	Massa específica	Sólidos	Tempo méd. reação
Superplastificante de 3 ^a geração	Policarboxilatos	Líquido viscoso	Bege	1,072 g/cm ³	31,2	8 min

Fonte: Cement Curacao Plant – Quality Control, Cimento Amazonas, 2008.

3.3 Água

Toda a água utilizada para o ensaio foi proveniente da rede de abastecimento direto, condicionado posteriormente à filtragem e deionização (figura 12), a fim de se remover possíveis partículas sólidas e íons (cloretos, fluoretos, etc.) encontrados em água potável da rede.



Figura 12 – Deionizador de água do Labest (COPPE/UFRJ).

3.4 Agregados miúdos

A areia empregada como agregado miúdo, tem duas procedências:

- (a) areia silicosa proveniente do rio Guandu e comercializada na cidade do Rio de Janeiro (local onde se efetuou ensaios para o projeto), ora denominada Areia A.
- (b) areia normatizada proveniente do rio Tietê, em São Paulo, para ensaios específicos, denominada Areia B (NBR 7214, 1982).

A areia utilizada na dosagem (areia A) foi a mesma utilizada por Fontes (2008) que apresenta curva granulométrica como mostra a figura 13 e características conforme as apresentadas na tabela 9 (ver Anexo A).

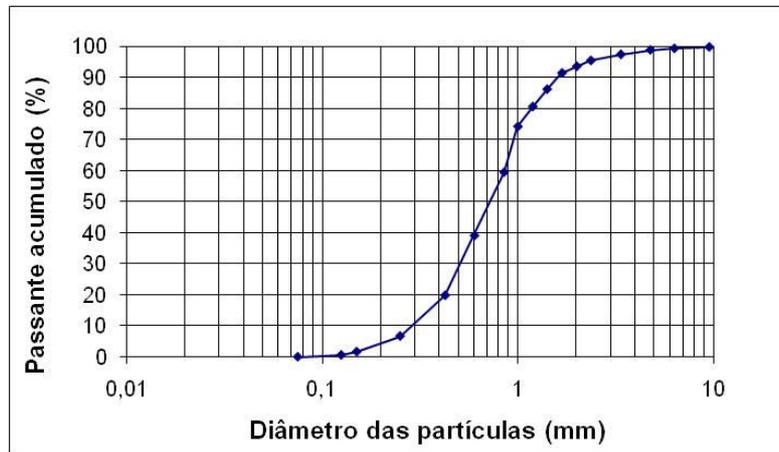


Figura 13 – Curva granulométrica da areia tipo A.

Tabela 9 – Características da areia tipo A empregada na argamassa.

Ensaio	Resultado	Norma
Módulo de finura (MF)	2,8	NBR NM 248 - ABNT, 2003
Dimensão máxima característica (DMC)	2,36	NBR NM 248 - ABNT, 2003
Massa específica	2,64	NBR NM 52 - ABNT, 2003
Absorção (%)	1,23	NBR NM 30 - ABNT, 2003

Fonte: FONTES, C. M. A. Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho. Tese de D. Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 294 p, 2008.

3.5 Resíduo de vidro

A oferta do resíduo de vidro é alta, porém a dificuldade de padronizar granulometrias distintas para sua utilização como agregado, associado ao potencial de reação, conforme citado em literatura (item 2.3.5), conduz a opção de utilizar o resíduo na forma de um pó fino com partículas semelhantes às partículas do cimento.

A opção pelo tipo de vidro sodo-cálcico decorre da sua maior utilização e produção no mercado, além disso, são os mais utilizados na indústria da construção civil para compor fachadas, janelas, portas, box de banheiros, peças de móveis, etc.

As amostras foram obtidas na empresa de beneficiamento Vidros Rio Ltda, que realiza a têmpera em placas de vidros e está localizada no Pólo Industrial da cidade de Manaus. Uma das etapas do processo é o desbastamento destas placas, cujo pó de vidro, produzido nesta fase, é sedimentado, e depois descartado no aterro municipal. Os restos das placas rejeitadas durante esse procedimento, também, são descartadas no aterro. A preferência por essa empresa permite coleta de vidros de composições semelhantes às relacionadas na pesquisa. A figura 14 apresenta a amostra de pó de vidro coletada na empresa obtida por sedimentação.



Figura 14 – Resíduo de pó de vidro.

4 MÉTODOS EMPREGADOS

4.1 Coleta e moagem do resíduo

4.1.1 Obtenção do resíduo

A escolha do vidro para a pesquisa foi influenciada pelo tipo e quantidade de vidro utilizado na construção civil, que são os vidros planos comuns, tipo sodo-cálcico. A coleta dos resíduos foi realizada na Empresa Vidros Rio, uma das empresas que mais comercializa este tipo de vidro no Estado do Amazonas. Esta produz resíduos de vidro na forma de cacos (obtidos em falhas durante o corte das placas) e partículas finas sedimentadas (obtidas com o beneficiamento de placas). Após a prévia definição de se utilizar vidros finamente moídos na pesquisa, optou-se pela coleta do “pó sedimentado”, visando minimizar os eventuais riscos de acidentes.

Os vidros beneficiados na empresa são oriundos de outros Estados, nos processos de cortes e polimentos, a utilização de água é essencial. Máquinas específicas para corte e polimento são empregadas como, por exemplo, a mostrada na figura 15. A massa de resíduo sedimentada é coletada a cada duas semanas, e formada a partir de partículas de placas de diferentes cores e fabricantes, o que proporciona maior heterogeneidade e melhor amostragem dos vidros planos que passam pela empresa.



Figura 15 – Máquina específica de desbaste e regularização de placas de vidro.

Durante o processo, a mistura pó e água é inevitável, havendo, assim, necessidade de se realizar um tratamento inicial antes dos despejos da mistura para o sistema de esgoto. A coleta do material de pó de vidro, obtido pelo desbaste de placas de vidros do tipo soda e cal, das mais variadas espessuras e tamanhos, se dá através de sedimentação em câmaras d'água em série (figura 16). No caso específico da empresa, isso promove a remoção de cerca de 250 kg/mês de resíduo de vidro, a qual vem trabalhando com cerca de 30 % de sua capacidade.



Figura 16 – Câmara de sedimentação do pó de vidro.

Tendo em vista que o resíduo gerado inicialmente é um material muito fino, sua sedimentação nas câmaras propiciou a formação de verdadeiras pedras artificiais de resistência elevada (figura 17). Para viabilizar o uso do resíduo, optou-se por utilizar o resíduo de vidro do tipo soda e cal ou sodo-cálcico, como um material fino. Para isso, houve a necessidade da utilização de moinhos para a obtenção de partículas de dimensões iguais ou inferiores as do cimento Portland.



Figura 17 – Pó do vidro sedimentado.

4.1.2 Processos de moagem do resíduo

Devido à falta de equipamentos específicos, a moagem do resíduo de vidro se deu primeiramente pela quebra do material sedimentado na máquina *Los Angeles* (figura 18-a), do Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Tecnologia da UFAM. O equipamento é constituído por um tambor de aço composto com corpos moedores de aço (bolas), que sofre rotações em seu eixo estabelecendo ciclos de rotações com o auxílio de um motor elétrico. Foram colocados 7 kg do material sedimentado de resíduo do pó de vidro, com um total de 12 bolas de aço, durante o ciclo de 800 rotações.

Após a moagem inicial, o resíduo cominuído foi separado e levado ao moinho de disco (figura 18-b) do Laboratório de Laminação da Faculdade de Geociências. Essa máquina é

composta por discos de aço onde, por meio de uma transmissão, um dos discos gira em alta velocidade face à face com outro disco à pequenas distâncias, pela qual os materiais a serem moídos sofrem pressão e rotação em elevada velocidade. No entanto, o sistema de regulagem do tamanho dos grãos do maquinário utilizado, ou seja, a distância entre os discos encontrava-se danificado e não ofereceu a distribuição granulométrica desejada.

A busca por outro equipamento de moagem se fez necessária. Assim, utilizou-se o pulverizador de rotor, o Pulverisette (figura 18-c) do Laboratório de Hidráulica e Saneamento da Faculdade de Tecnologia da UFAM. O aparelho dispõe de um rotor de titânio com 12 nervuras e um anel de peneira de aço inoxidável a seu redor (com abertura de 0,5 mm), a força centrífuga e o atrito dos dentes com a peneira pulverizam o material, deixando-o com diâmetros menores que 0,5 mm, uma vez que, por regra empírica, $2/3$ do material fornecido é mais fino que $1/2$ do diâmetro dos furos da peneira. A etapa seguinte à este processo foi o peneiramento para se obter resíduo passante na peneira de 0,075 mm.

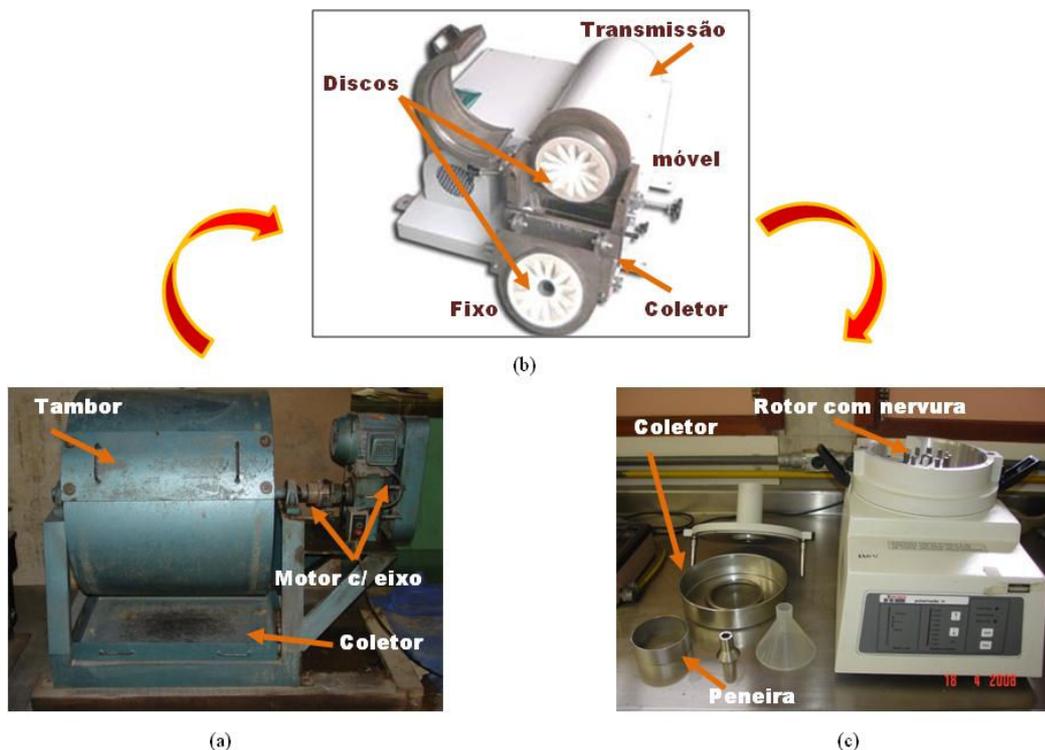


Figura 18 – Moagem: (a) máquina de abrasão *Los Angeles*; (b) moinho de discos e; (c) pulverizador de rotor.

4.1.3 Moagem ultrafina

Após a moagem inicial, a moagem ultrafina foi realizada no Laboratório de Metalurgia da COPPE/UFRJ visando à obtenção de partículas iguais ou menores que as do cimento. Esta moagem foi realizada durante 5, 10, 20, 40, 80 e 160 minutos. Utilizou-se copos moedores (bolas) do tipo esferas metálicas com cerca de 3 mm de diâmetros (figura 19-c) e rotação em torno de 200 rpm, em moinho planetário modelo PM-4 da Retsch, do Laboratório de Metalurgia da COPPE/UFRJ (figura 18-a).

O moinho é provido de quatro porta-jarros e utiliza jarros de ágata com capacidade de 0,5 litros de volume útil (figura 19-b) e corpos moedores de diversos tipos de materiais. Os jarros são fixados de maneira a equilibrar o peso, a partir daí comanda-se o ensaio. É aplicada uma rotação no sentido horário na base de suporte dos jarros (figura 19-d), porém durante essa rotação da base, outra rotação no sentido anti-horário é feita pelos jarros o que proporciona uma melhor moagem.

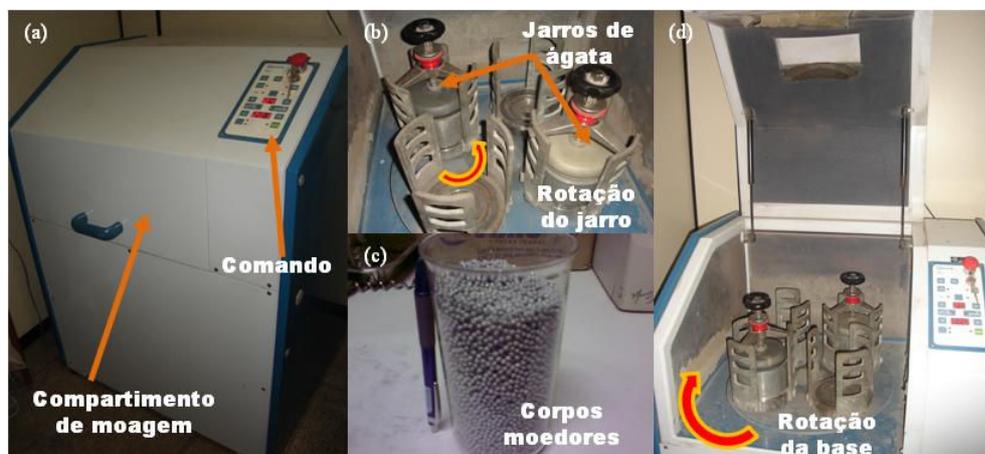


Figura 19 – Moinho planetário: (a) visão geral do equipamento; (b) fixação dos jarros de ágata; (c) corpos moedores e; (d) disposição dos jarros.

No processo de moagem do resíduo estabeleceram-se os volumes de materiais a serem utilizados da seguinte forma: os corpos moedores devem ocupar metade do volume útil do jarro, ou seja 0,25 litros e, como regra geral, o volume de vazios entre os corpos moedores é de 30 a 40 %, tal volume é o que deverá ser preenchido pelo resíduo a ser moído. Assim,

trabalhou-se com volume de vazios de 40 %, obtendo-se um volume de carga de moagem (resíduo de vidro) de 0,1 litro.

Os volumes de corpos moedores e carga de moagem foram medidos, e em seguida pesados de forma a se obter uma distribuição de massa igualitária nos jarros. Para isso, trabalhou-se com os valores de massa de cerca de 1.233 g de corpos moedores e 114 g de carga de moagem. Dessa forma, as amostras foram submetidas a moagem durante os tempos estipulados, e a cada tempo atingido, foram retiradas quantidades de amostras necessárias para ensaio granulométrico em um analisador de partículas de raios laser do Laboratório de Estruturas – LabEst da COPPE/UFRJ. Após as análises das curvas granulométricas, o tempo de moagem foi definido. Durante a moagem, retiraram-se também amostras com tempos de moagem de 30 e 60 min para análise. A figura 20 mostra a distribuição das amostras no interior dos jarros em tempos distintos. A posterior separação do resíduo de vidro moído (RVM) e dos corpos moedores se deu através do peneiramento, com peneira de malha ligeiramente inferior ao diâmetro dos corpos moedores.

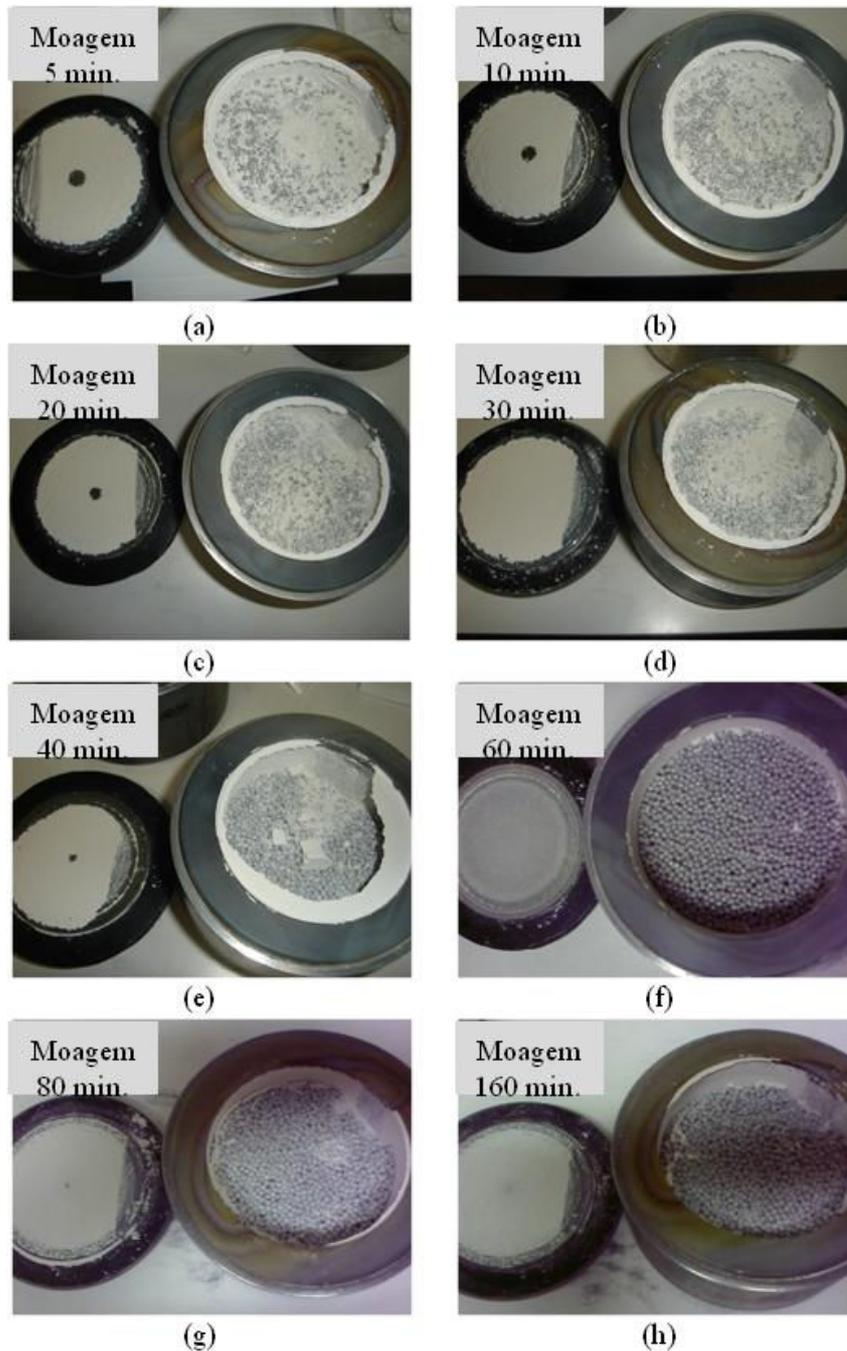


Figura 20 – Detalhes da moagem produzida em moinho planetário em tempos distintos: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 20 min; (d) 30 min; (e) 40 min; (f) 60 min; (g) 80 min e; (h) 160 min.

Com a escolha do tempo adequado no processo de moagem, levou-se o resíduo à estufa de 50 °C, onde permaneceu até pesagem para cada batelada de moagem. Após a moagem de todo resíduo, misturou-se previamente todo o lote de amostra e efetuou-se nova análise granulométrica com o analisador de partículas à laser do LabEst – COPPE/UFRJ. Por

fim, o material então foi acondicionado em saco plástico e levado a uma câmara quente a temperatura de 38 °C, a fim de se ter um material isento de umidade.

4.2 Caracterizações do resíduo de vidro moído (RVM)

4.2.1 Granulometria à laser

É de grande relevância a obtenção de dados sobre o tamanho das partículas de agregados a serem empregados na matriz cimentícia, mesmo nas etapas de cominuição para obter o controle e otimização de aditivos minerais (CORDEIRO, 2006). A granulometria à laser é uma técnica bastante utilizada para determinar a granulometria de materiais como pós finos, pois a granulometria destes intervém no comportamento dos materiais. A utilização da técnica de espalhamento de luz vem se tornando popular na indústria em função da simplicidade operacional, reprodutibilidade e por permitir a medição de partículas com tamanhos desde a escala sub-micrométrica até a milimétrica (GUARDANI *et al.*, 1999).

Dal Molin (2007), explica que granulometria a laser baseia-se no princípio de difração Fraunhofer, onde o ângulo de difração de um feixe de luz monocromática que atravessa uma população de partículas é tão maior, quanto menor for o tamanho dessas partículas. O autor ainda esclarece que a maioria das partículas analisadas não são perfeitamente esféricas, podendo o diâmetro estimado divergir do qual a partícula realmente se apresenta. A técnica permite a análise de amostras em pó, suspensão ou emulsão, com o auxílio de um agente para desaglomerar as partículas, quando necessário.

Segundo Florêncio e Selmo (2006), em meio líquido, a desaglomeração pode ser feita por agente surfactante, ou mesmo por meio físico como bomba e/ou ultra-som. Quando a composição dos materiais não é conhecida, em geral se usa água deionizada ou álcool como meio dispersante e a escolha do meio deve proporcionar “molhabilidade” das partículas, de

maneira que, não ocorram reações entre o meio e a amostra, não seja tóxico, seja de baixo custo, transparente e homogêneo, e dissolva o agente surfactante com facilidade.

O princípio do ensaio consiste na passagem do material através de um canal de vazão conhecida, onde ocorre a incidência de um raio laser, a intensidade do feixe luminoso é medido por um receptor. Assim, quando há passagem da partícula no canal, esta oferece uma “sombra” de determinada área, que o receptor capta e calcula a diferença do feixe luminoso para gerar a distribuição granulométrica em determinado volume.

Os ensaios de granulometria à laser foram realizados em analisador de partículas a laser Malvern Mastersizer (figura 21), com unidade de leitura a úmido, no setor de análises físico-químicas do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. O dispersante utilizado foi água deionizada em um béquer de 600 ml.

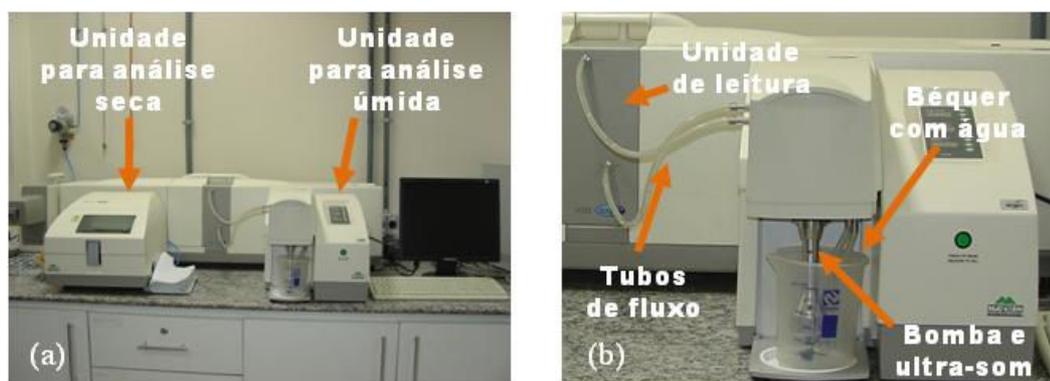


Figura 21 – Aparelho de granulometria à laser: (a) vista do conjunto e; (b) detalhe da unidade de leitura via úmida.

A quantidade de material adicionado ao sistema foi determinada por meio da obscuração, entre as faixas de 8 a 20 %. Para as condições de ensaio, como não havia um índice de refração do material, utilizou-se como parâmetros o modelo de Fraunhofer e forma de partícula irregular devido o processo de moagem ao qual foi submetido, além disso, trabalhou-se com a velocidade da bomba de 2.500 rpm e o ultra-som foi utilizado no nível 5, até se obter uma dispersão adequada do material.

Depois de realizadas as análises, alguns dados como o diâmetro médio (D_{50}), diâmetro de 90 % (D_{90}) e 10 % (D_{10}) do material foram determinados, além das curvas granulométricas foram plotadas para melhor análise.

4.2.2 Massa específica

Os ensaios de massa específica são necessários no processo de caracterização, pois é um parâmetro para realização de ensaios específicos e, também, seu conhecimento se reflete nas transformações de traços em volume e nos cálculos de consumos dos materiais.

Os ensaios de massa específica foram realizados para o aditivo mineral, através de picnometria a gás hélio, pelo equipamento AccuPyc 1340 da Micromeritics (figura 22), do Laboratório de Estruturas – LabEst da COPPE/UFRJ. O RVM analisado foi previamente pesado em um tubo metálico cilíndrico em balança eletrônica com precisão de 0,0001g e, em seguida, levado ao aparelho, onde os dados de massas são digitados. Com isso, efetua-se a leitura pela a variação de pressão em um volume calibrado. Deve-se ressaltar que o material utilizado para análise não deve apresentar umidade, pois pode acarretar em um erro de leitura.

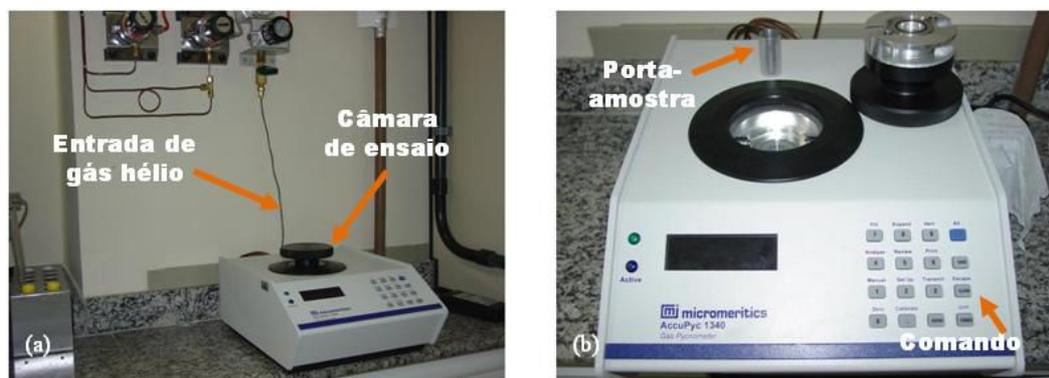


Figura 22 – Aparelho de massa específica à gás: (a) vista geral e; (b) vista frontal com câmara de gás aberta e porta amostra utilizado.

4.2.3 Composição química

Alguns componentes em resíduos podem ser ambientalmente indesejáveis ou possuírem algum componente que possa prejudicar sua interação com outros materiais

utilizados conjuntamente. De maneira que, ao se conhecer determinada composição dos materiais, pode-se ter uma idéia de sua utilização e dos benefícios ou prejuízos que os mesmos poderiam provocar em contato com outros componentes do compósito. Em matriz cimentícia, a composição química pode influenciar na hidratação.

As análises de determinações elementares foram realizadas no Laboratório de estruturas – LabEst na COPPE/UFRJ. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva, o EDX 720 da Shimadzu (figura 23). Esse equipamento realiza análise elementar do Na a U, com tubo de ródio (Rh) e detector de Si(Li) resfriado com nitrogênio líquido. O ensaio consiste no preenchimento, com o material a ser analisado, de um porta-amostra cilíndrico de plástico com fundo de PVC, por onde os raios X passam.



Figura 23 – Espectrômetro de fluorescência de raios x – EDX 720.

4.2.4 Difração de raios X – DRX

O ensaio de difração de raios X (DRX) é utilizado para identificar fases cristalinas e estudar as estruturas cristalinas de algumas fases, identificando elementos químicos presentes. Isto é, a partir deste tipo de análise podem-se conseguir informações sobre estrutura, composição e estado de materiais policristalinos (DAL MOLIN, 2007).

O ensaio basicamente consiste em emitir um feixe de onda de raios X constante em uma amostra, variando progressivamente o ângulo de incidência desse feixe. Sabe-se que cada substancia possui um padrão de difração da radiação, assim, uma determinada amostra gera uma difração de raios em ângulos diferentes que são captados pelo aparelho de difração. Então, a cada mudança de ângulo, o raio incidido é difratado em determinados ângulos e identificado pelo computador, onde se verifica as substancias constituintes em comparação com os tipos de difrações padrões disponíveis.

O estudo da estrutura cristalina por aplicação de raios X, segundo HALLIDAY *et al.* (1996), foi deduzido por W. L. Bragg, o qual explica que os raios X podem ser refletidos por cristais e os átomos podem ser visualizados ao longo de planos paralelos espaçados a uma distancia (figura 24). Assim, em sólidos cristalinos, os átomos se ordenam em planos separados entre si a uma distância de mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda de raios X.

Sendo assim, a direção da onda incidente, a partir da superfície de um plano de átomos e o comprimento de onda deve obedecer a lei de Bragg (equação 7).

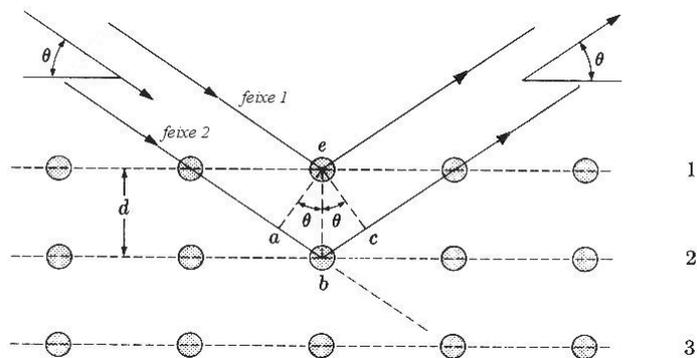


Figura 24 – Difração de raios X pela lei de Bragg.

Fonte: <http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/BancoApostilasImagens/Arquivos/apraios-x/apraios-x.pdf>

$$\lambda q = 2d \cdot \text{sen } \theta \quad (7)$$

Onde, q: ordem de reflexão (q = 1, 2, 3...) e

λ : comprimento de ondas dos raios X incidentes;

d : distância interplanar;

θ : ângulo de difração.

No ensaio utilizou-se o equipamento de difração de raios X D8 Focus da Bruker (figura 25), com radiação monocromática de cobre ($\text{Cu K}\alpha$), do Laboratório de estruturas da COPPE/UFRJ.

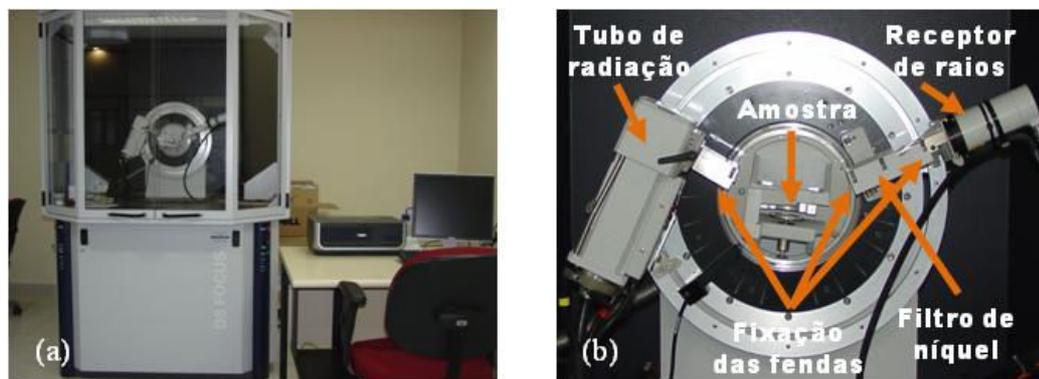


Figura 25 – Equipamento de difração: (a) vista frontal do D8 Focus - Bruker e; (b) detalhe de disposição dos acessórios.

A preparação das amostras se deu pela moagem com almofariz e mão-de-gral. Após isso, as amostras foram peneiradas em peneira de $75 \mu\text{m}$ e, em seguida, foram levadas à estufa a $40 \text{ }^\circ\text{C}$, até constância de massa (em torno de 15 min). Em seguida, o material é compactando, com auxílio de uma placa de vidro, em um porta-amostra com área cilíndrica de diâmetro de cerca de 20 mm foi altura de 1 mm, como pode ser observado na figura 26. Após a moldagem, o porta-amostra é acoplado na parte central do aparelho de difração, onde ocorre a emissão de raios X varrendo diversos ângulos de emissão (de acordo com a Lei de Bragg). Os feixes de luz emitidos passam por uma fenda de abertura de 0,6 mm, antes de atingir a amostra. Após a difração do feixe luz, o mesmo passa por outra fenda de 0,6 mm e, em seguida, por um filtro de níquel, até que, finalmente ultrapassa a última fenda de 0,1 mm e é captado por um receptor. Os ângulos são enviados e lidos por software computacional, gerando gráfico de fase, com ou sem picos bem definidos, que podem proporcionar a detecção

da composição da amostra por meio de padrões já estudados em literaturas. Os parâmetros de análise para o resíduo de vidro foram: tensão de 40 V e corrente de 30 mA, velocidade angular (incremento) de 0,02°/s, intervalo de medida entre os ângulos de Bragg (2θ) de 8 a 60 e tempo de aquisição de 1 s.

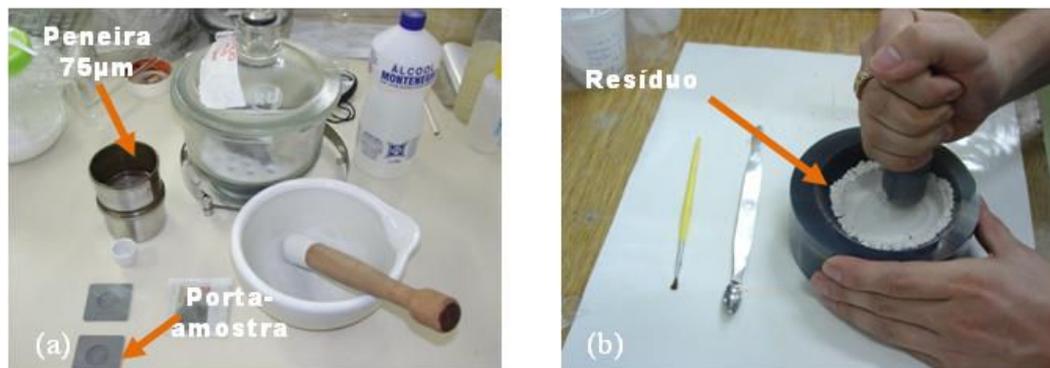


Figura 26 – Preparação para análise de difração de raios X: (a) material utilizado e; (b) cominuição dos grãos.

4.2.5 Atividade pozolânica

Alguns aditivos minerais utilizados em matriz cimentícia produzem alterações que podem ocorrer devido características de pozolanicidade que algumas adições podem proporcionar. Desta forma, para se analisar um material que, possivelmente, possui uma reação de pozolanicidade, alguns ensaios são necessários. Todavia, o mais comumente empregado é o índice de atividade pozolânica – IAP, realizada com cimento.

O ensaio é regido pela NBR 5752/1992 e consiste na confecção de duas argamassas com traço em massa de 1 : 3 (cimento : areia), sendo a areia normatizada de acordo com a NBR 7214/1982. Um traço de argamassa foi produzido com 312 g de cimento, noutro, 35 % do volume de cimento foi substituído pelo material pozolânico, mas ambas as argamassas devem conter quantidades de água necessárias à produção do índice de consistência de (225 ± 5) mm. Os traços foram realizados em misturador mecânico planetário. Os corpos-de-prova de 5 x 10 cm, após a moldagem foram mantidos em ambientes úmidos nas primeiras 24 h. Em

seguida, após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram envoltos com filme plástico (figura 27-a), sendo posteriormente acondicionados em recipiente hermético (figuras 27-b e 27-c) e levados à estufa a uma temperatura (T) de $(38 \pm 2) \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 27 dias, pois os corpos-de-prova devem ser resfriados ao ar para o rompimento à compressão com 28 dias completos.



Figura 27 – Ensaio de índice de atividade pozolânica: (a) corpo de prova com filme plástico, após o desmolde; (b) e (c) acondicionamento em recipiente hermético, envolvido com filme plástico para melhor selagem e; (d) estufa com circulação de ar utilizada.

Os rompimentos dos corpos-de-prova por compressão foram realizados em prensa servo-hidráulica modelo UH-F1000kNI, da Shimadzu (do Labest – COPPE/UFRJ), na velocidade de 0,1 mm/min e demais condições como prescrito na NBR 7215/1996. De posse dos resultados de compressão, o índice de atividade foi obtido pela equação 8:

$$\text{IAP} = \frac{f_{cp}}{f_c} \cdot 100 (\%) \quad (8)$$

Onde,

IAP: índice de atividade pozolânica com o cimento Portland;

f_{cp} : resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com o cimento Portland e material pozzolânico;

f_c : resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com o cimento Portland.

4.2.6 Superfície específica

Segundo a NBR NM 76/1998, a área superficial por unidade de massa é utilizada para verificar a uniformidade no processo de moagem na fábrica de cimento. Os materiais com mesma granulometria podem apresentar superfícies específicas diferentes devido a forma e rugosidade das partículas e devido sua estrutura interna de poros. O conhecimento da superfície específica é necessária e importante para se verificar a interação dos materiais, geralmente sólido-líquido, pois as adições minerais em mistura cimentícia, a quantidade de água consumida depende deste parâmetro, bem como, da quantidade de adição ou substituição realizada. Além disso, reações de uma maneira geral podem ocorrer mais rapidamente, devido o aumento da área de contato.

Uma das técnicas empregadas para obtenção da superfície específica foi desenvolvida por Blaine, e consta na NBR NM 76/1998. No permeâmetro de Blaine (figura 28) do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo – CENPES/Petrobras, o ensaio consiste na passagem do ar pelo material compactado analisado, com porosidade definida e durante um determinado tempo para a determinação da superfície. Após o ensaio, a equação 9 permite conhecer a superfície específica do resíduo.



Figura 28 – Aparelho permeômetro de Blaine

$$S_e = \frac{K_i}{\rho} \times \frac{\sqrt{\omega^3}}{(1+\omega)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \quad (9)$$

Onde,

S_e : superfície específica;

K_i : constante do aparelho;

ρ : massa específica do material analisado;

ω : porosidade da camada ($\omega=0,500$);

t : tempo

η : viscosidade do ar à temperatura do ensaio.

4.2.7 Microscopia óptica

É usado para ampliar imagens de pequenas estruturas impossíveis de serem observadas a olho nu. O processo de visualização se dá por meio de lentes oculares e objetivas. A ampliação total se dá pelo produto entre as ampliações de cada uma das lentes (objetivas e oculares)

Com o equipamento de microscopia ótica se observa detalhes ou áreas superficiais. Para a avaliação da morfologia externa, a estrutura do resíduo utilizado foi observada pela o microscópio do tipo lupa estereoscópica Olympus, modelo SZH10 (figura 29), equipada com máquina fotográfica, utilizando lente objetiva de 2x com zoom de 5x, do Instituto de Macromoléculas – IMA/UFRJ.

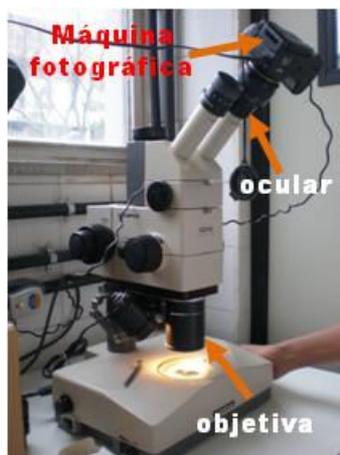


Figura 29 – Microscópio estereoscópico SZH10.

O resíduo foi espalhado em lâminas de vidro para visualização, a imagem observada é enviada ao sistema de vídeo com o auxílio de um televisor, o que permite discussão e consenso sobre a estrutura junto ao operador técnico.

4.2.8 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

O Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV é um estudo bastante utilizado, no que diz respeito à microestrutura dos materiais, bastante aplicada na caracterização de minérios, pois é capaz de gerar imagens com grande ampliação permitindo visualização do contorno dos grãos, defeitos cristalinos, poros, deformações, metamorfismo, mecanismos formadores, entre outros. O funcionamento do MEV se dá através da emissão de feixes de elétrons, em vácuo, por um filamento capilar de tungstênio, por aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 kV e 30 kV. No MEV a energia emitida pelas partículas é transcodificadas

gerando imagens virtuais visíveis em um monitor de computador. Tais imagens podem ser ampliadas em até 300.000 vezes.

O equipamento utilizado para este tipo de estudo foi o MEV da marca Jeol, modelo JSM – 6460LV. Acoplado ao MEV, tem-se também, o EDS da Thermo Electron Corporation, ambos de domínio do Instituto Nokia de Desenvolvimento Tecnológico – INDT, empresa instalada no pólo industrial de Manaus. Tal equipamento é utilizado em conjunto com um computador e programas específicos (Figura 30).



Figura 30 – Aparelho MEV JSM – 6460LV (Fonte: <http://fap01.if.usp.br/~lff/mev.html>)

Tendo em vista a necessidade de um parâmetro de comparação para estudo visual, foram utilizadas amostras do pó de vidro em conjunto com o cimento portland CP I – 32.

Amostras, menores que 1 g, foi colocada em um filme metálico (adesivo) junto a um porta-amostra cilíndrico, como mostra a figura 31 (a) e (b). Este último foi fixado em um aparato metálico que é preso na câmara de vácuo do MEV (figura 31 (c) e (d)). Após a captura de imagens ampliadas no MEV.

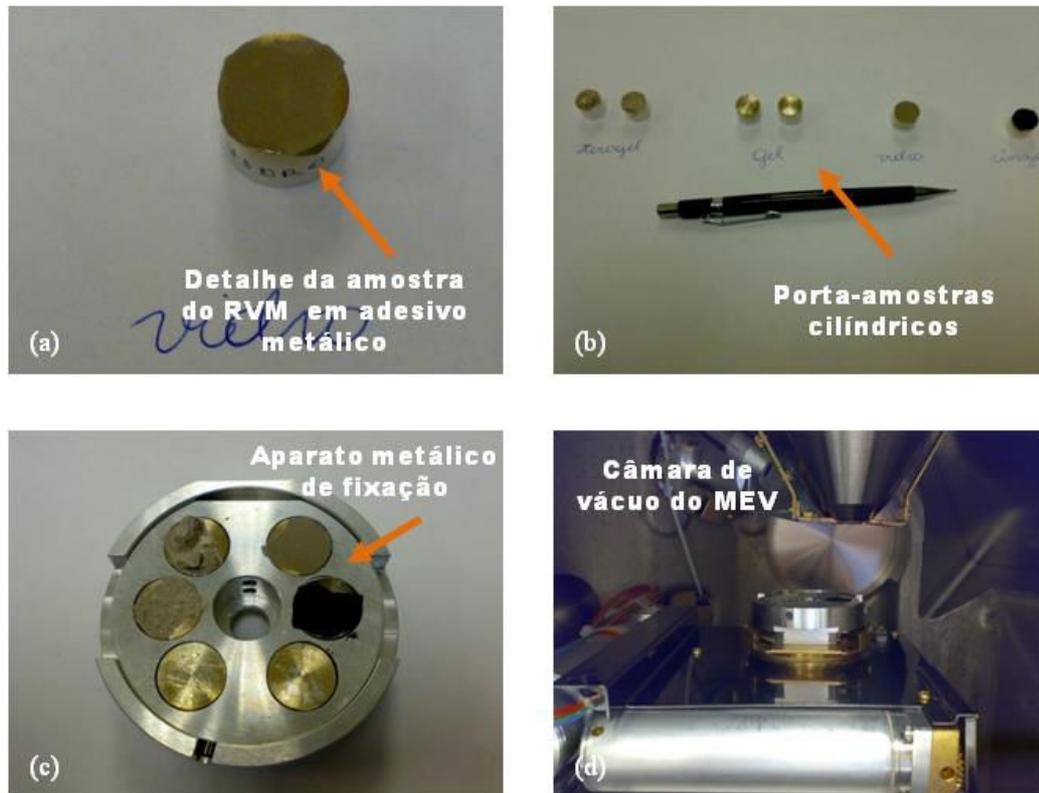


Figura 31 – Análise no MEV: (a) vidro no filme metálico; (b) porta-amostras cilíndricos; (b) Fixador metálico e; (c) vista interna da câmara do MEV

4.2.9 Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo consistiu, basicamente, na determinação da perda de massa da amostra submetida a uma temperatura de $(950 \pm 50) \text{ }^\circ\text{C}$ em forno mufla do Laboratório de estruturas (Labest) da COPPE/UFRJ, (figura 32) conforme as prescrições da NBR 5743 (ABNT, 1989). A taxa de aquecimento utilizada foi de $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ e tempo de residência de 15 min ao chegar na temperatura estipulada. O valor de perda ao fogo é obtido pela média aritmética das amostras, obtidas pela equação 10, tal ensaio foi realizado tanto para o cimento como para o RVM.

$$\text{PF} = \frac{m_{110} - m_{950}}{m_{110}} \times 100 \quad (10)$$

Onde,

PF: perda ao fogo;

m_{110} : massa da amostra seca em estufa a $(110 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$;

m_{950} : massa da amostra calcinada a $(950 \pm 50) \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 32 – Forno mufla utilizado no ensaio de perda ao fogo.

Cada amostra apresenta-se com cerca de 1 g, antes da realização da queima. Estas amostras foram dispostas em cadinhos de porcelanas e, o peso das amostras antes e após a queima, foram medidos em balança de precisão de 0,0001 g, além de serem mantidas em dessecador para resfriamento (figura 33).



Figura 33– Amostras do RVM, após o ensaio de perda ao fogo.

4.3 Caracterização do CPI

No tocante à caracterização do cimento Portland comum (CPI) utilizado, sabe-se que, a reutilização de laudos físico-químicos é realizada por alguns fornecedores ou que alguns componentes químicos são eliminados por apresentarem teores pequenos. Assim, com a preocupação dos reais valores de caracterização físico-química e visando eliminar quaisquer dúvidas referentes ao cimento utilizado, o material foi caracterizado em ensaios específicos, apesar do laudo expedido pelo fornecedor.

4.3.1 Tamanho de partículas, massa específica, análise química e superfície específica

O tamanho das partículas de cimento foram analisadas pela técnica de granulometria à laser, como já descrito anteriormente no item 4.2.1. Na análise do CPI, utilizou-se álcool etílico como dispersante, inibindo alguma reação com o cimento. A velocidade da bomba de dispersão era de 2.000 rpm sem ultra-som, sendo empregado o modelo de cimento disponível na biblioteca do programa computacional e forma de partícula irregular.

A análise de massa específica por picnometria a hélio, realizado no CPI, segue o explanado no item 4.2.2. A composição química do cimento foi realizada da mesma maneira que o RVM (item 4.2.3) e a superfície específica, de acordo com o item 4.2.6, onde a utilização da equação 9 ainda se faz necessária.

4.3.2 Termogravimetria e análise térmica diferencial

A melhor compreensão das propriedades dos materiais leva a busca de técnicas que ajudam na análise da sua estrutura. As técnicas de análise térmica têm sido bastante utilizadas no estudo de matriz cimentícia, pois promove a identificação de mudanças físicas e/ou químicas de uma mistura em condições controladas de temperatura (DAL MOLIN, 2007).

A termogravimetria, TG, é utilizada na determinação de reações de decomposição das substâncias, teor de umidade, cinzas, entre outros, o que ocorre a partir da variação de massa em função do aumento gradual de temperatura e condições de aquecimentos previamente estabelecidos. A curva de TG gerada pode relacionar, também, a massa em função do tempo, para obtenção da velocidade de reação e composição do material.

A análise termogravimétrica diferencial (DTG) é utilizada para examinar mudanças físico-químicas, de um material de referência e da amostra estudada, através de picos endotérmicos, por meio do registro da curva DTG. Os materiais são submetidos às mesmas condições de temperatura e aquecimento, sendo a curva obtida pela perda de massa em função da temperatura. Na pesquisa, a análise térmica diferencial e a termogravimetria foram efetuadas conjuntamente por meio do equipamento SDT Q600, módulo TGA/DSC, da TA Instruments (figura 34-a), do Laboratório de estrutura da COPPE/UFRJ. O equipamento é composto de um forno com aquecimento até 1500 °C, termopares para controle de temperatura acoplado ao sistema de termobalança com sensibilidade de 0,1 µg e capacidade de 200 mg, panelinha de platina (porta-amostra) de 110 µL alocada na extremidade do termopar (figura 34-d). A preparação das amostras e limpeza da panelinha de platina deve ser feita com auxílio de luvas e outros acessórios, como mostram as figuras 34-b e 34-c.

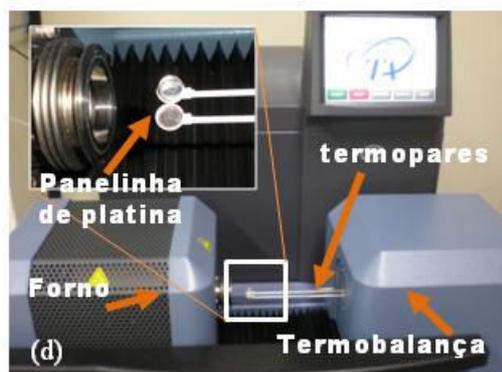
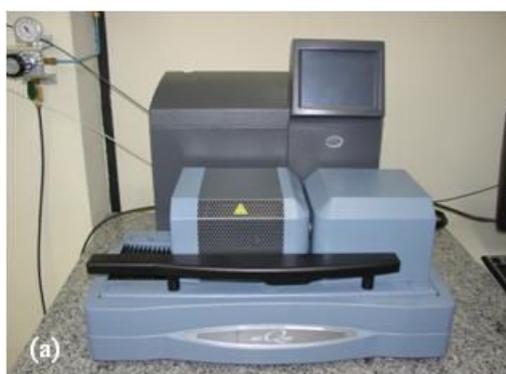


Figura 34 – Análise térmica: (a) equipamento SDT Q600; (b) preparo de amostras para ensaio; (c) acessórios utilizados no preparo de amostras e; (d) detalhes do equipamento.

O CPI analisado foi coletado em tubos plásticos eppendorf, selados com filme plástico e armazenados em dessecador. As massas das amostras pesada encontravam-se na faixa de 10 a 12 mg, tomando-se o cuidado de espalhá-las bem na panelinha de platina, evitando qualquer prisão de gases na amostra que pudesse comprometer o ensaio.

O patamar de temperatura do forno estabelecida foi de até 1000 °C, aquecendo a uma taxa de 10 °C / min, para o CPI. As curvas TA e DTG são obtidas em tempo real e trabalhadas posteriormente com o auxílio do software Universal Analysis 2000.

O teor de hidróxido de cálcio em cada pasta foi calculado com relação à massa calcinada de cimento e seguindo as seguintes etapas de cálculo:

i. Resultados obtidos nas curvas de TG: porcentagem de massa em relação à massa base calcinada de resíduo.

$$MCch/mf = \frac{CHfi}{M_{1000}} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

CHfi: Porcentagem de massa calcinada da pasta após a decomposição do CH em relação a massa base inicial;

M₁₀₀₀: Porcentagem de massa final da pasta a 1000 °C em relação a massa base inicial.

ii. Resultados obtidos nas curvas de TG: porcentagem de massa em relação à massa base calcinada de cimento. Este cálculo só é realizado para as pastas com substituição do cimento por outro material. Nas pastas de referência essa fórmula é igual à anterior.

$$MCr/ox = \frac{MCch/mf}{O_{Cr}} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

$MC_{ch/mf}$: Porcentagem de massa calcinada da pasta após a decomposição do CH em relação a massa calcinada de resíduo;

O_{cT} : Porcentagem dos óxidos do cimento em relação aos óxidos totais.

iii. Porcentagem de óxidos do cimento em relação aos óxidos totais de óxidos totais.

$$O_{cT} = \frac{Oc}{Oc + Or} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

Oc: Óxidos do cimento;

Or: Óxidos do resíduo.

iv. Óxidos de cimento.

$$Oc = \frac{(100 - \%R) \times C_{1000}}{100} \quad (14)$$

Onde:

%R: Porcentagem de resíduo empregada;

C_{1000} : porcentagem de cimento a 1000 °C.

v. Óxidos do resíduo, porcentagem de resíduo empregada vezes a porcentagem de resíduo a 1000 °C.

$$Or = \frac{\%R \times R_{1000}}{100} \quad (15)$$

Onde:

%R: Porcentagem de resíduo empregada;

R_{1000} : Porcentagem de massa do resíduo a 1000 °C.

vi. Cálculo percentual em relação às respectivas massas calcinadas.

$$\%CH = \frac{M_{Cr_{ACH}} - M_{Cr_{DCH}}}{0,2432} \quad (16)$$

Onde:

$M_{Cr_{ACH}}$: Porcentagem de amostra antes da decomposição do CH em relação a massa base calcinada do cimento;

$M_{Cr_{DCH}}$: Porcentagem de amostra depois da decomposição do CH em relação a massa base calcinada do cimento;

0,2432: Perda teórica do hidróxido de cálcio (CH).

vii. Cálculo percentual em relação a massa base inicial calcinada de cimento.

$$\%CHf = \frac{\%CHc \times C_{1000}}{100} \quad (17)$$

Onde:

$\%CHc$: Porcentagem de hidróxido de cálcio em relação às respectivas massas bases calcinadas de cimento;

C_{1000} : massa calcinada de cimento

4.4 Produção e caracterização de pastas

Em alguns ensaios específicos, torna-se mais fácil as análises em pastas do que em argamassas ou concretos. Desta forma, optou-se pela produção de pastas com o resíduo

trabalhado, de modo a verificar ainda, a interação do RVM em presença do cimento na mistura.

4.4.1 Cone Marsh

O ensaio de cone Marsh (figura 35) é utilizado para determinação da compatibilidade e do ponto ótimo ou ponto de saturação (PS) do cimento com o superplastificante (SP) utilizado. Este ponto de saturação corresponde ao ponto de dosagem, onde qualquer acréscimo de superplastificante não afeta de maneira significativa a reologia da pasta.

O ensaio consiste em registrar o tempo necessário para uma pasta de cimento escoar e preencher uma proveta de 1000 litros, através de um cone com abertura de diâmetro igual a 5 mm. A mesma pasta é utilizada nos tempos de escoamento de 10, 30 e 60 min, a contar do início do contato da água/superplastificante com o cimento. Todas as misturas foram realizadas com um misturador mecânico e a quantidade de cimento utilizada foi de 1.800 g com relação água/cimento de 0,35.

As porcentagens de superplastificante (SP) utilizadas foram 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7 %, do teor de sólidos, relativos ao peso do cimento.

O procedimento de mistura e medição segue os seguintes passos:

- Pesagem da água e do SP no copo do misturador com o auxílio de balança com precisão de 0,01 g;
- Para o primeiro ponto de escoamento, mistura-se por 10 s a água e o superplastificante e adicionar o cimento em um tempo de até 50 s;
- Após o tempo de 1 min e 30 s, contados a partir do contato da água com o cimento, o misturador é desligado durante 15 s, para limpeza da parede do copo. A seguir mistura-se novamente até completar 8 min;
- Completados 8 min de mistura, a pasta é posta em descanso por 1 min, para posterior mistura durante 30 s. Em seguida, é vertida no cone Marsh dentro do tempo de 30 s restante, permanecendo um tempo de 10 min;
- A pasta é escoada pela abertura do funil ao completar os 10 min, sendo medido o tempo para preencher o béquer de 1000 ml, ao final do processo o material

volta ao recipiente e permanece em descanso até o próximo tempo de escoamento;

- Para o ponto de escoamento de 30 min, o material em repouso é misturado 1 min antes de atingir seu tempo, de forma a ser dividido em 30 s de mistura e 30 s para verter o material no cone e iniciar seu escoamento durante determinado período de tempo para completar a proveta de 1.000 ml. De mesma forma procede-se com o tempo de escoamento de 60 min.

Ao final do ensaio foram gerados os gráficos do tempo de escoamento *versos* dosagem de SP, no qual se verifica a compatibilidade entre o cimento e o SP, além do ponto de saturação.



Figura 35 – Ensaio de compatibilidade e teor de saturação pelo cone Marsh.

4.4.2 Dosagem de pastas

As misturas para pastas foram realizadas com o CPI e relação água/aglomerante de 0,40. A mistura consiste na substituição parcial da massa de cimento pelo RVM, nas

proporções de 0%, 10%, 15% e 20 %. No entanto, para realizar uma comparação entre as misturas, foram fixadas a relação água/aglomerante e consistência.

Para a medida de consistência, utilizou-se o tronco de cone (do ensaio de argamassa), para medição do espalhamento das pastas, o qual foi previamente fixado em (270 ± 20) mm. A obtenção desse espalhamento, com mesma relação água/aglomerante, incide no uso do superplastificante em pequenos teores, previamente estipulados e menores que o ponto de saturação entre o CPI e o superplastificante Glenium 51.

Na confecção das pastas utilizou-se um misturador de palhetas Chandler, modelo 30-60 nas velocidades de 4.000 e 12.000 rpm em conjunto com os acessórios para controle e moldagem dos corpos-de-prova como mostram as figuras 36-a e 36-b. Pesaram-se previamente os materiais: água, superplastificante, cimento e RVM, em balança de digital com precisão de 0,01 g.

Com a água e o superplastificante pesados conjuntamente, efetuou-se uma mistura prévia de 10 s à 4000 rpm, em seguida o cimento com o RVM (misturados previamente) foi adicionado dentro do tempo de 15 s. A mistura ocorreu durante 6 min à 4.000 rpm e, após isso, o misturador passou à 12.000 rpm por 2 min.



Figura 36 – Equipamentos: (a) misturador de palhetas Chandler e; (b) materiais utilizados para confecção de pastas.

Ao final da mistura, mediu-se o espalhamento da pasta, com o tronco de cone, em uma chapa metálica sobre uma mesa plana (figura 37-a). A partir daí, corpos-de-prova cilíndricos de 2,5 x 5 cm foram moldados. Os moldes utilizados, compostos de tubos de PVC e base de

acrílico, foram preenchidos em uma só camada e adensados por um bastão de vidro com movimentos lentos e circulares por 30 s. Ao final, os corpos-de-prova foram envoltos por panos úmidos e recipiente plástico, oferecendo um ambiente úmido saturado durante as primeiras 24 h, conforme visto na figura 37-b, seguido de cura posterior em água saturada com cal.

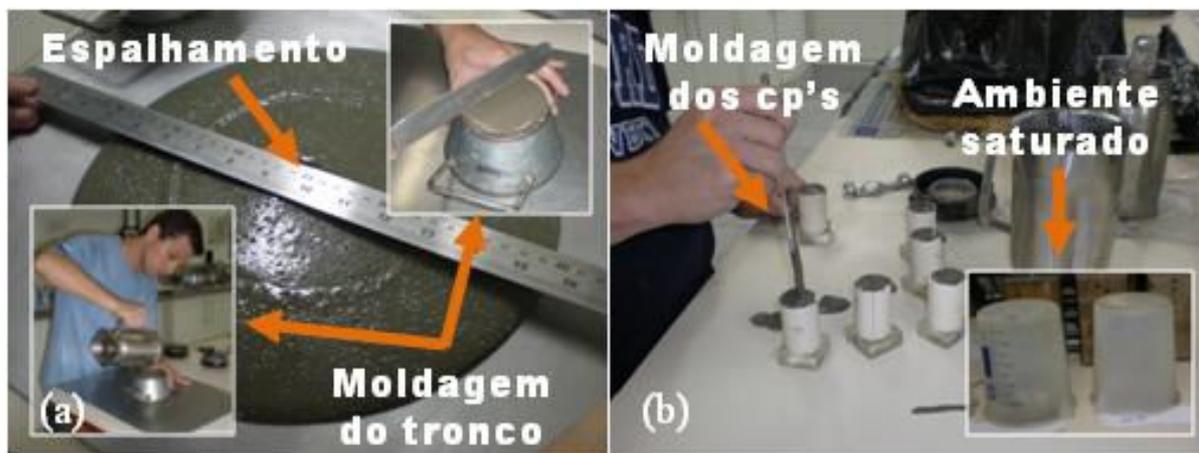


Figura 37 – Confeção das pastas: (a) medida do espalhamento pelo tronco de cone e; (b) adensamento dos corpos-de-prova no molde e cura em recipiente úmido.

4.4.3 Difração de raios X das pastas

Foram realizadas difrações de raios X das pastas nas proporções de substituição já especificadas (0, 10, 15 e 20 %) e em idades de 3, 7, e 28 dias. O princípio e as condições do ensaio seguem conforme descrito no item 4.2.4.

Porém, devido à problemas de disponibilidade horários para utilização do equipamento de difração, os traços foram confeccionados, em dias distintos, em um béquer de 50 ml e misturado com um bastão de vidro por 8 min. Os materiais misturados foram separados em pequenos sacos plásticos, selados e curados dentro de um dessecador para as análises de difração, como mostra a figura 38.



Figura 38 – Confeção das pastas para análise de difração: (a) mistura e coleta das pastas e; (b) amostras curadas no dessecador e prontas para preparação do ensaio.

4.4.3 Análise térmica das pastas

As análises térmicas das pastas foram realizadas da mesma maneira que o exposto no item 4.3.2. As misturas utilizadas para análise térmica foram realizadas de acordo com o item 4.4.2, onde as amostras foram coletadas em sacos plásticos bem selados e armazenados no dessecador até completar as idades de cura, como mostra a figura 39. Para o processo de análise, as pastas foram pulverizadas em um cadinho com o auxílio de espátula. As idades de cura analisadas na pasta para o ensaio foram de 3, 7, 28 e 55 dias, para os teores de substituição de 0, 10, 15, e 20 %.



Figura 39 – Amostras retiradas durante a mistura das pastas para ensaios de análise térmica.

4.4.4 Ensaio de resistência mecânica

O ensaio de resistência à compressão axial é regido pela NBR 5739/2003. O equipamento utilizado para obtenção dos dados de resistência à compressão de argamassas e pastas confeccionadas foi a prensa servo-hidráulica Shimadzu com capacidade de 1000 kN, modelo UH-F1000kNI do Labest – COPPE/UFRJ (figura 40). A velocidade de carregamento ou taxa de deslocamento utilizada no ensaio foi de 0,1 mm/min.

Os corpos-de-prova para ensaios de compressão devem dispor de faces planas e paralelas entre si, de forma que ocorra uma distribuição igualitária da carga aplicada. A regularização dos corpos-de-prova de pastas (2,5 x 5 cm) para ruptura foram realizadas através de faceamento em um torno mecânico, conforme figura 41.



Figura 40 – Prensa servo-hidráulica Shimadzu UH-F1000 kNI.

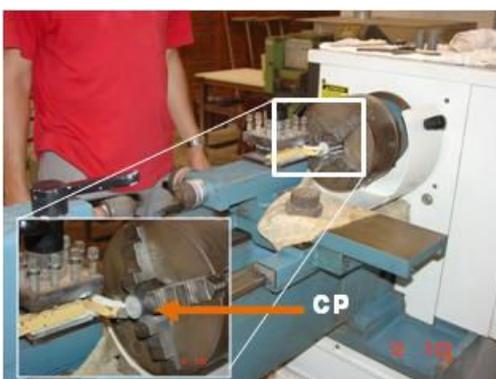


Figura 41 – Faceamento dos corpos-de-prova de pasta em torno mecânico.

4.4.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

A durabilidade de pastas e argamassas está relacionada com a sua porosidade no estado endurecido. Para tanto, o conhecimento do volume, distribuição e tamanho de poros é necessário, de forma que, para aquisição desses dados, uma técnica bastante utilizada que detecta poros de 300 μm a 3 nm é aplicada, conhecida por porosimetria por intrusão de mercúrio.

O princípio de ensaio baseia-se na aplicação de uma dada pressão, propiciando a intrusão de um volume de mercúrio nos poros da amostra. A força ou pressão aplicada se iguala à força necessária para manter o mercúrio fora do poro (tensão superficial (γ), representada na equação 18).

$$r_p = \frac{-2\gamma\cos\Phi}{P} \quad (18)$$

Onde:

r_p : raio do poro;

γ : tensão superficial do líquido (mercúrio);

Φ : ângulo de contato entre o líquido e o sólido;

P: pressão externa aplicada.

As amostras foram preparadas de forma a se obter um volume de 1 cm^3 (arestas = 1 cm). Os copos-de-prova cilíndricos de 2,5 x 5 cm foram cortados, com auxílio de disco adiamantado, e sua forma obtida por desbaste em um esmeril elétrico (figura 42).

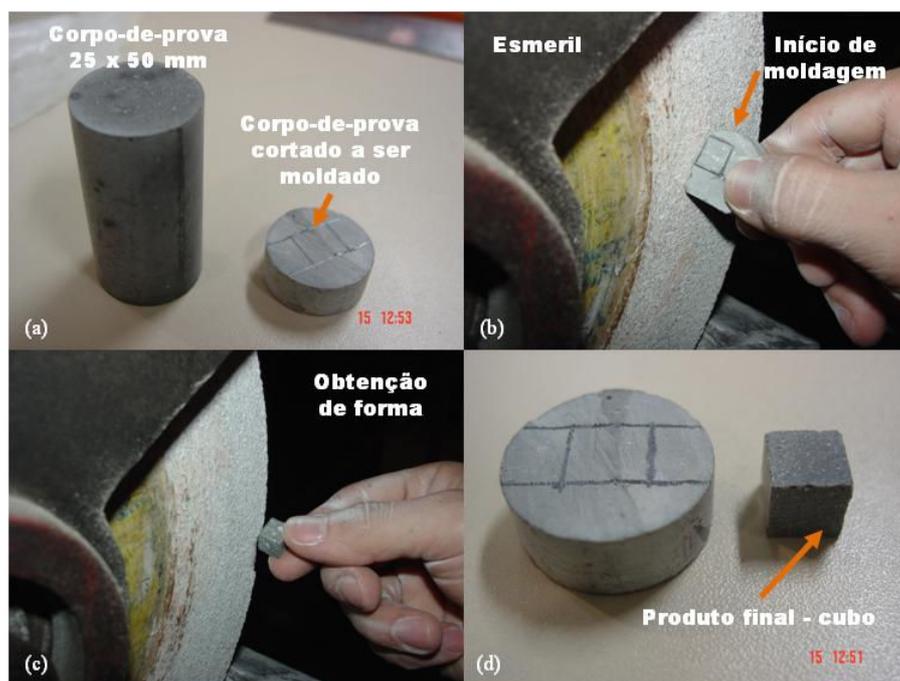


Figura 42 – Produção de corpos-de-prova par ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

A produção dos cubos foi realizada em corpos-de-prova que se apresentavam em idade de 28 dias. Após a obtenção dos cubos necessários à análise de porosimetria, estes foram mergulhados em acetona e, posteriormente, em álcool etílico para cessar a hidratação das amostras de pastas produzidas da seguinte forma: as amostras foram submersas em um béquer contendo acetona durante o tempo de 3 min e lavadas com álcool etílico por 1 min. Após este processo, colocou-se o material em recipiente de porcelana para seu envio à estufa com circulação de ar de 38 °C para evitar a rehidratação da amostra. Os utensílios empregados e a estufa utilizada são mostrados nas figuras 43 e 44.

Após a interrupção da cura, os corpos-de-prova das pastas foram enviadas ao laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP para análise de porosimetria por intrusão de mercúrio.



Figura 43 – Materiais utilizados para cessar a hidratação das amostras dos cubos de pasta produzidos.



Figura 44 – Estufa utilizada no processo.

4.5 Produção e caracterização das argamassas

4.5.1 Dosagem das argamassas

Para a confecção de argamassa, utilizou-se areia de rio, anteriormente denominada areia A, e o CPI conjuntamente com uma relação água/aglomerante de 0,40. Escolheu-se um traço de referência 1 : 2 : 0,40 (relação em massa). Os traços adicionais utilizados consistiram na substituição parcial do cimento Portland por resíduo de vidro em pó, nas proporções de 0,

10, 15 e 20 %. Todos os materiais utilizados para a confecção dos traços encontravam-se previamente secos e foram mantidos em câmara quente à temperatura de 39 °C, até sua utilização.

Para efeito de comparação entre as argamassas, a relação água/aglomerante e índice de consistência foram mantidos com ajuda da utilização de superplastificante. Com isso, o índice de consistência adotado foi de (280 ± 20) mm. As argamassas foram produzidas em misturador mecânico planetário do Labest – COPPE/UFRJ, as etapas da produção são mostradas na figura 45. Inicialmente, pesou-se e misturou-se água e superplastificante, empregando velocidade baixa, até completar 1 min, de maneira que, o aglomerante seja adicionado durante os primeiros 20 s. A adição de areia foi realizada nos 20 s seguintes, deixando os 20 s restantes para homogeneização da mistura.

Após o tempo de 1 min, mudou-se a velocidade para a alta, realizando-se a mistura por mais 3 min. Posteriormente, desligou-se o misturador, deixando a massa em repouso durante 2 min, para em seguida ser misturada por mais 2 min. Este procedimento foi adotado para todos os traços realizados, devido o tempo médio de reação do SP ser de 8 min.

Efetou-se a medição do índice de consistência pelo abatimento do troco de cone (figura 45-b) na mesa de consistência, conforme prescrito na NBR 7215/1996. A moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de 5 x 10 cm em 3 camadas, foi realizada em com mesa vibratória durante 15 s para cada uma das camadas (figura 45-c). Os corpos-de-prova foram envoltos por panos úmidos e sacos plásticos durante as primeiras 24 h, promovendo um ambiente úmido, sendo enviados, posteriormente, à câmara úmida para continuidade do processo de cura (figura 45-d).

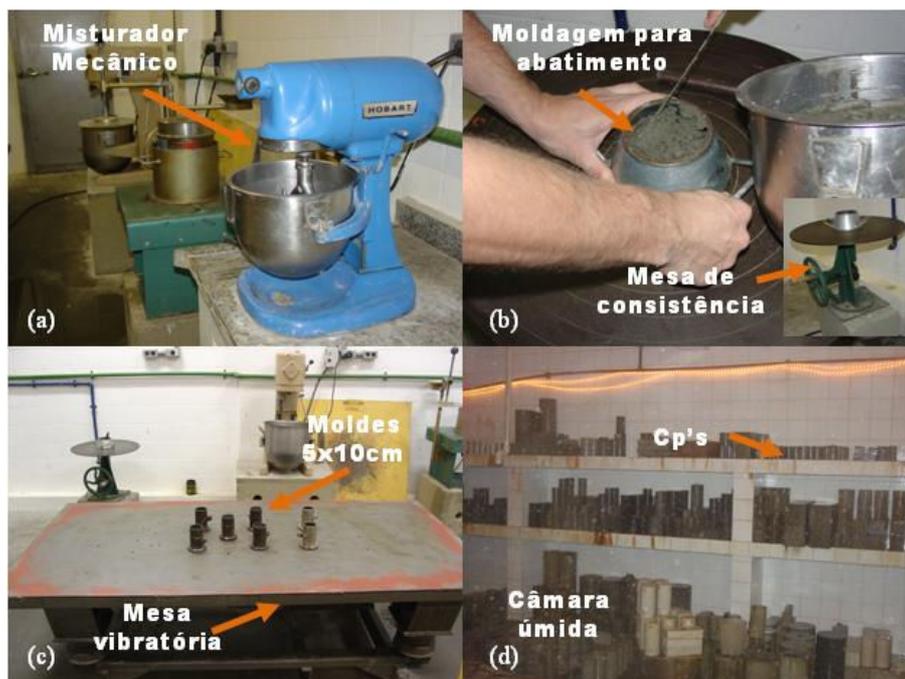


Figura 45 – Produção das argamassas: (a) misturador planetário; (b) ensaio e índice de consistência; (c) adensamento de camadas nos moldes com mesa vibratória e (d) câmara úmida para cura dos corpos-de-prova.

4.5.2 Ensaio Mecânicos

Os ensaios de resistência à compressão das argamassas confeccionadas foram executadas da na mesma prensa utilizada para pastas, Shimadzu UH-F1000kNI. A velocidade de carregamento adotada foi de 0,1 mm / min.

A regularização das superfícies superiores e inferiores dos corpos-de-prova, para as argamassas, foi obtida por meio de capeamento, o qual consiste em uma mistura de enxofre e cinzas no traço 1 : 3 (em volume), como mostra a figura 46.



Figura 46 – Regularização de argamassas para ensaio de resistência à compressão: (a) capela com chapa aquecedora para derreter o enxofre; (b) detalhe da mistura de enxofre e cinzas e; (b) capeamento dos corpos-de-prova.

4.5.2.1 Módulo de elasticidade das argamassas

Nas argamassas efetuou-se a aquisição dos dados de tensão x deformação, para cálculo do módulo de elasticidade das misturas realizadas. O deslocamento obtido se deu através de transdutores elétricos longitudinais (LVDT's), posicionados no terço médio dos corpos-de-prova (figura 47). Conforme o andamento do ensaio de compressão, os sinais foram coletados e transmitidos ao sistema de aquisição de dados (Lynx), o qual gera os dados de carga e deslocamento para produção da curva tensão *versus* deformação, necessária para cálculo do módulo.

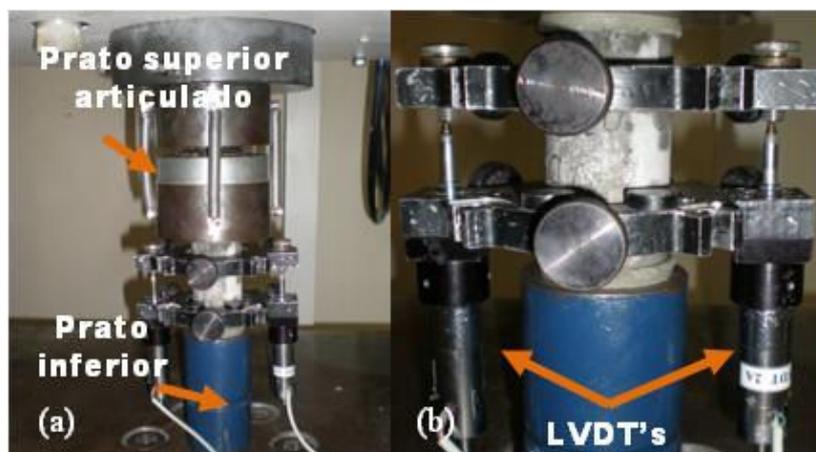


Figura 47 – Ensaio de compressão com aquisição de deslocamento: (a) fixação do corpo-de-prova nos pratos de compressão e; (b) detalhe dos LVDT's e sua fixação no corpo-de-prova.

O módulo de elasticidade é uma medida de resistência à deformação elástica do material. Segundo a NBR 8522/2003, o módulo de elasticidade é obtido pela curva tensão deformação através das equações 19 e 20.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{\varepsilon_{c2} - \varepsilon_{c1}} \quad (19)$$

Onde:

E_{ci} : Módulo de elasticidade secante;

σ_{c1} : tensão de compressão relativa à deformação de 0,5 MPa;

σ_{c2} : tensão correspondente à 30% da tensão máxima;

ε_{c1} : deformação correspondente σ_{c1} ;

ε_{c2} : deformação produzida pela σ_{c2} .

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (20)$$

Onde:

E_c : Módulo de elasticidade cordal;

σ_1 : tensão de compressão correspondente à deformação de $5 \cdot 10^{-5}$ milionésimos;

σ_2 : tensão correspondente à 40% da tensão máxima;

ε_1 : deformação correspondente a $5 \cdot 10^{-5}$ milionésimos;

ε_2 : deformação produzida pela σ_2 .

4.5.3 Absorção de água por imersão e capilaridade

A absorção de água total por imersão e por capilaridade é um dos requisitos necessários para julgamento da durabilidade da matriz cimentícia, devido estar sujeita aos processos de intempéries como chuvas e ao contato direto com águas associadas a agentes agressivos. Por isso, faz-se necessário um exame para verificar as melhorias com a utilização de novos materiais associados, como por exemplo, os vazios e a absorção de águas. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova de argamassa cilíndricos de 5 x 10 cm, após 28 dias de cura em sala climatizada (22 °C) do Labest da COPPE/UFRJ.

4.5.3.1 Absorção total por imersão

A absorção de água por imersão foi realizada como prescrito na NBR 9778/2005, onde ocorre a penetração da água (A_t) nos poros corpo-de-prova, o que possibilita a determinação do índice de vazios (I_v) e massa específica (ρ_r).

O ensaio foi realizado em corpos-de-prova previamente secos em estufa à temperatura de 60 °C, até constância de massa, o que ocorreu em 14 dias. A opção pela temperatura de 60 °C e não de 105 °C, como recomenda a norma, se deu devido ocorrer a evaporação da água de constituição e decomposição de alguns produtos de hidratação como a etringita em temperaturas de cerca de 70 °C.

A constância de massa é alcançada quando a diferença entre duas pesagens, em intervalos de 24 h, não seja maior que 0,5 % da menor massa. A partir daí, os corpos-de-prova foram totalmente imersos em água à temperatura ambiente de 22 °C, durante 72 h, onde após

isso, eram colocados em um recipiente com água levada à ebulição por um período de 5 h após resfriamento natural, os corpos-de-prova eram pesados em balança hidrostática e balança normal com a superfície seca (figura 48).



Figura 48 – Ensaio de absorção por imersão total: (a) corpos-de-prova em estufa de 60 °C para constância de massa; (b) imersão total por 72 h; (c) detalhe dos corpos-de-prova imersos; (d) corpos-de-prova levados à ebulição após 72 h imersos; (e) pesagem dos corpos-de-prova imersos após fervura e; (f) pesagem dos corpos-de-prova saturados com superfície seca.

Por medida criteriosa, os corpos-de-prova foram mantidos imersos, à temperatura ambiente, por mais 72 h, sendo pesados novamente, a fim de se evitar qualquer erro de leitura que porventura ocorresse. Dessa forma, com os dados coletados, efetuou-se os cálculos de absorção, índice de vazios e massa específica através das equações 21, 22 e 23.

$$A_t = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 (\%) \quad (21)$$

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 (\%) \quad (22)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (23)$$

Onde,

A_t : absorção total;

I_v : índice de vazios;

ρ_r : massa específica;

m_{sat} : massa do corpo-de-prova saturada em água, após fervura (superfície seca);

m_s : massa do corpo-de-prova seca em estufa;

m_i : massa do corpo-de-prova saturada imersa em água (balança hidrostática).

4.5.3.2 Absorção por capilaridade

Para a absorção por capilaridade, os corpos-de-prova foram secos em estufa. O ensaio seguiu conforme a NBR 9779/1995. Atingida a constância de massa, os corpos-de-prova cilíndricos foram selados lateralmente com fita de alumínio, visando obter um fluxo unidirecional e sem perdas

Depois de selados, os corpos-de-prova foram pesados e colocados em contato com a lâmina d'água de 5 mm (figura 49). A pesagem dos corpos-de-prova, após o contato com a água, ocorreu nos tempos de 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 1440 e 2880 min. O valor numérico da absorção por capilaridade é obtido pela equação 24.

$$A_c = \frac{m_c - m_s}{A_s} \quad (24)$$

Onde,

m_s : massa do corpo-de-prova seca em estufa;

m_c : massa do corpo-de-prova após o contato com água durante o período de tempo estipulado;

A_s : área da seção transversal do corpo-de-prova.



Figura 49 – Ensaio de capilaridade: (a) corpo-de-prova selado com fita de alumínio; (b) obtenção da massa do conjunto seco; (c) disposição dos corpos-de-prova no aquário e; (d) detalhe dos corpos-de-prova e lâmina d'água.

4.5.4 Reação álcali-agregado

A reação álcali-sílica (RAS) é uma patologia deletéria que ocorre em misturas cimentícias, provenientes da reação entre materiais ricos em sílica e os álcalis do cimento, de forma que, os silicatos ou minerais de sílica, sílicas hidratadas ou amorfas, podem vir a reagir em ambientes alcalinos. Esta reação ocorre pelo ataque dos hidróxidos alcalinos aos materiais silicosos, resultando em um gel de álcali-silicato, depositando-se em poros, na superfície dos

agregados reativos ou nos planos mais fracos. O gel absorve água, o que proporciona um gradual aumento de volume, exercendo pressão interna na matriz, promovendo a ocorrência de microfissuras que vão aumentando até atingir a superfície do matriz, gerando uma fissuração mapeada (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A reação depende de diversos fatores como o tempo, a temperatura, o tamanho da partícula, o grau de desordem da estrutura, a porosidade e superfície de contato. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o material finamente moído pode apresentar evidências da reação álcali-sílica, porém sua expansão não é significativa. O autor expõem que os casos de reação álcali-agregado ocorrem em partículas na faixa de 1 a 5 mm.

Os ensaios para verificação da reação álcali-agregado foram realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 15577/2008, onde barras de argamassas 25x25x285 mm são moldadas e submetidas à medições constantes das expansões dimensionais por um mínimo de 28 dias (figura 50). As barras de argamassa foram confeccionadas com o cimento com alto teor de álcalis e agregado reativo de basalto no traço 1 : 2,25 : 0,47 (cimento : agregado : água, em peso), porém, um traço foi realizado como referência e outro com substituição de 20 % do cimento por RVM (ver Anexo C). Escolheu-se a maior porcentagem de substituição, pois se o material apresenta alguma reação, ficará bem mais evidente com a maior porcentagem utilizada, de forma contrária, podemos observar que, se não há reação no maior teor de substituição, em teores menores também não ocorrerá.



Figura 50 – Procedimento de leitura da expansão das barras de argamassa.

Fonte: Carvalho, 2008.

Após desmolde das barras, estas são submersas em recipiente com água e aquecida gradualmente até chegar aos 80 °C, permanecendo imersa durante 24 h por um período de estabilização. Em seguida as barras são retiradas rapidamente e medidas em sala climatizada com temperatura de 23 °C (em tempo máximo de 15 s) para o início da medição, sendo então, submersas em solução de NaOH 1N a 80 °C para cura de 28 dias em ambiente alcalino, medidos periodicamente, acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 15577/2008.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Teor de impurezas orgânicas, materiais pulverulentos e torrões de argila da areia.

Além das caracterizações já realizadas por Fontes (2008), realizou-se também ensaios de teor de materiais pulverulentos (NBR NM 46, 2003), torrões de argila (NBR 7218, 1987) e impurezas orgânicas húmicas (NBR NM 49, 2001).

Segundo o resultado de impurezas orgânicas, a areia do rio Guandu se apresentou com coloração mais clara que à solução padrão. Dessa forma, pode-se afirmar que a areia pode ser utilizada como agregado sem proporcionar prejuízos à matriz, por não possui teor de impurezas maior que 300 ppm. Na figura 51 podem ser observadas a solução padrão e a amostra de areia ensaiada.



Figura 51 – Solução padrão (à esquerda) e solução com a amostra de areia avaliada (à direita).

O teor de materiais pulverulentos encontrado foi de 1,56%, valor inferior ao limite estipulado pela NBR NM 46 (ABNT, 2003) que é de 3%. Já a quantidade de torrões de argila

encontrada no agregado miúdo é de 2,4% quantidade inferior ao estipulado pela NBR 7218 (ABNT, 1987), que deve ser menor que 3%.

5.2. Caracterização do cimento Portland comum – CPI

5.2.1 Análise granulométrica, massa específica e superfície específica.

A curva granulométrica do cimento Portland (figura 52) mostra que o material apresentou tamanho médio igual a 38,4 μm . A distribuição granulométrica do cimento mostra, ainda, que a amostra possui 90 % (D_{90}), 50% (D_{50}) e 10 % (D_{10}) das partículas iguais a 38,4 μm , 12,8 μm e 2,71 μm , respectivamente. O coeficiente de não uniformidade do cimento (C_{nu}) foi de 6,42. A superfície específica Blaine obtida foi igual a 404,8 m^2/kg diferentemente do resultado fornecido pelo fabricante que foi de 338,8 m^2/kg , mostrando que o cimento é mais fino do que se esperava. Sua massa específica, obtida por picnometria a gás (hélio), foi de 3137 kg/m^3 .

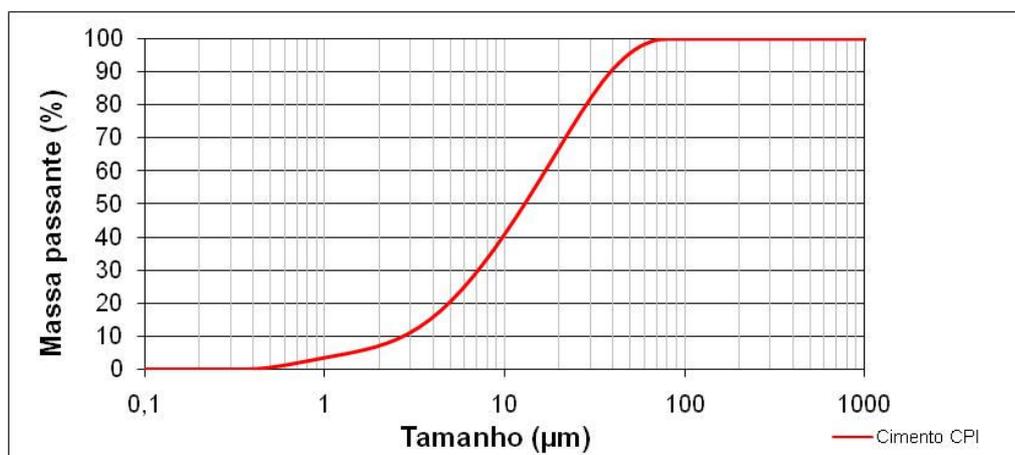


Figura 52 – Curva granulométrica do cimento Portland Comum.

5.2.2 Curvas TG/DTG

Pela análise das curvas TG/DTG, apresentadas na figura 53, o CPI anidro apresentou indícios de uma pequena pré-hidratação, observada pela decomposição dos produtos de hidratação em temperaturas menores que 150 °C (primeiro pico) e decomposição de uma pequena quantidade de portlandita (CH) em cerca de 372 °C (segundo pico). Já em temperaturas entre 500 °C e 800 °C (terceiro pico), ocorre a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃).

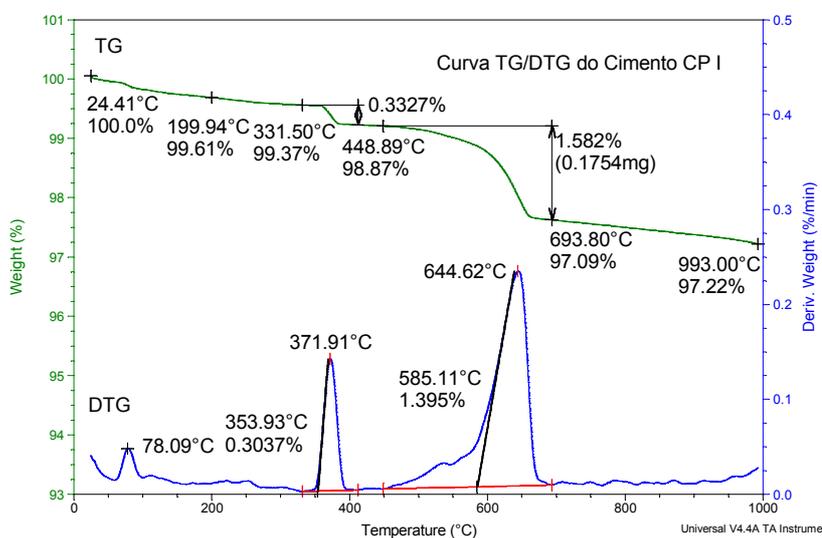


Figura 53 – Curvas TG/DTG do cimento Portland Comum.

A hidratação precoce é imperceptível a olho nu e pode ter ocorrido pela manipulação tátil e/ou ser proveniente do contato atmosférico durante a embalagem, transporte, disposição do saco de cimento ou mesmo na manipulação para seu uso, entretanto, este valor de hidratação é muito baixo e não afeta expressivamente a utilização do cimento. A perda ao fogo da amostra, obtida conforme prescreve a NBR 5743 (ABNT, 1989), foi de 2,8% e apresenta compatibilidade com a perda de massa realizada pela curva TG que foi de 2,9%.

5.2.3 Difração de raios X

Os compostos cristalinos presentes no cimento Portland podem ser identificados na figura 54, onde se observa a presença dos compostos que o constituem, como C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF , $CaSO_4$ e o $Ca(SO_4)_2$.

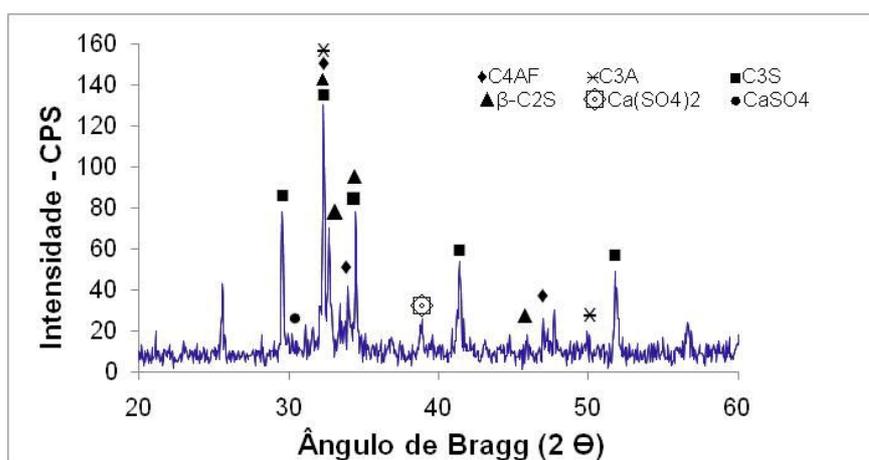


Figura 54 – Difratograma do cimento Portland Comum.

5.3 Produção e caracterização do resíduo ultrafino de vidro

5.3.1 Moagem ultrafina - seleção granulométrica.

As distribuições granulométricas das amostras de resíduo de vidro são apresentadas na figura 55. As curvas permitem a observação da distribuição dos grãos do resíduo, bem como, o perfil das curvas após as moagens ultrafinas realizadas em tempos diferentes. Os resíduos de vidro cominuídos (curva base - alimentação), inicialmente apresentavam cerca 30% dos seus grãos com diâmetro superior a 100 μm , e pouco mais de 35% com diâmetros maiores que 75 μm , sendo o diâmetro médio (D_{50}) inferior a 37 μm .

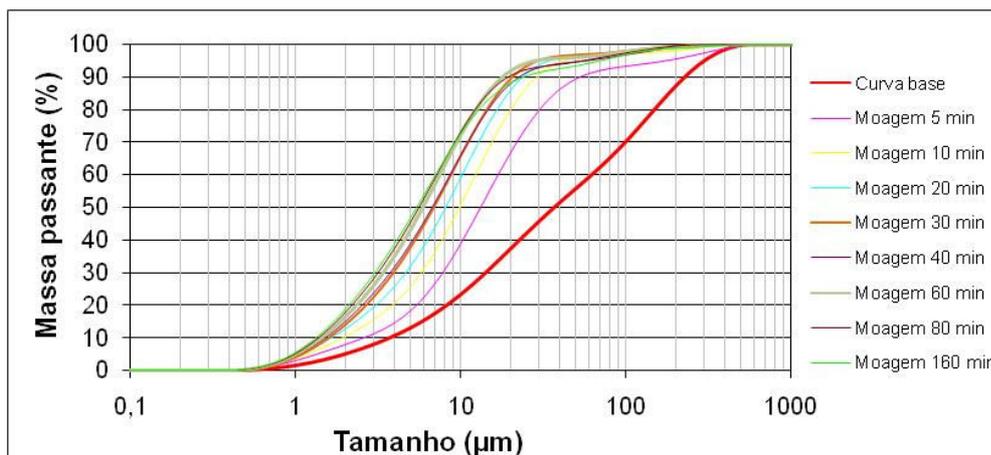


Figura 55 – Curvas granulométricas do resíduo de vidro cominuído em moinho de bolas (curva base) e das amostras moídas por 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80 e 120 minutos.

Observa-se uma redução expressiva no tamanho de partículas com apenas 5 min de moagem, diminuindo de 30 % para menos de 10 % e de 35 para 8 %, o tamanho das partículas maiores que 100 μm e 75 μm , respectivamente. Para os demais tempos de moagem (10, 20, 30, 40, 60, 80 e 160 minutos), 90% do resíduo já se encontrava com partículas menores que 75 μm (tabela 10) e após a moagem de 10 min, pouca diferença na distribuição granulométrica é notada. Buscou-se trabalhar com uma granulometria inferior a do CPI e um tempo de moagem relativamente baixo. O tempo de 30 min, que apresentou D_{90} na ordem de 20 μm , foi o escolhido para a realização da moagem ultrafina do resíduo de vidro.

Tabela 10 - Diâmetros dos grãos de cimento para 10%, 50% e 90 % da amostra, obtidos para os tempos de moagem estipulados e o coeficiente de uniformidade de cada amostra.

Tempo (min)	Diâmetros (μm)			C_{nu}
	10%	50%	90%	
0	3,69	36,61	226,03	16,35
5	2,57	13,12	52,27	6,76
10	1,91	9,76	28,71	6,01
20	1,64	8,05	23,56	6,12
30	1,56	6,81	20,59	5,59
40	1,50	6,68	22,38	5,80
60	1,42	5,86	17,80	5,33
80	1,37	5,55	19,22	5,56
160	1,32	5,36	23,73	5,01

Desta forma, o tempo de moagem de 30 min foi adotado, pois os tempos inferiores apresentavam menos que 95% do diâmetro menor que 38 μm . Todo o resíduo foi moído no tempo de 30 min e acondicionado em saco plástico e uma nova curva de granulometria foi realizada após a moagem de todo material necessário para os ensaios apresentados neste trabalho.

5.3.2 Granulometria a laser, massa específica e superfície específica.

Outra análise realizada mostrou que o RVM sofreu uma redução maior no tamanho de partículas para o tempo de 30 min (figura 56), o que pode ter corrido devido ao processo contínuo de moagem no tempo estipulado, pois anteriormente as amostras foram coletadas em intervalos de tempo que eram acumulados até a coleta seguinte, o que diminuiu a temperatura interna do jarro de moagem.

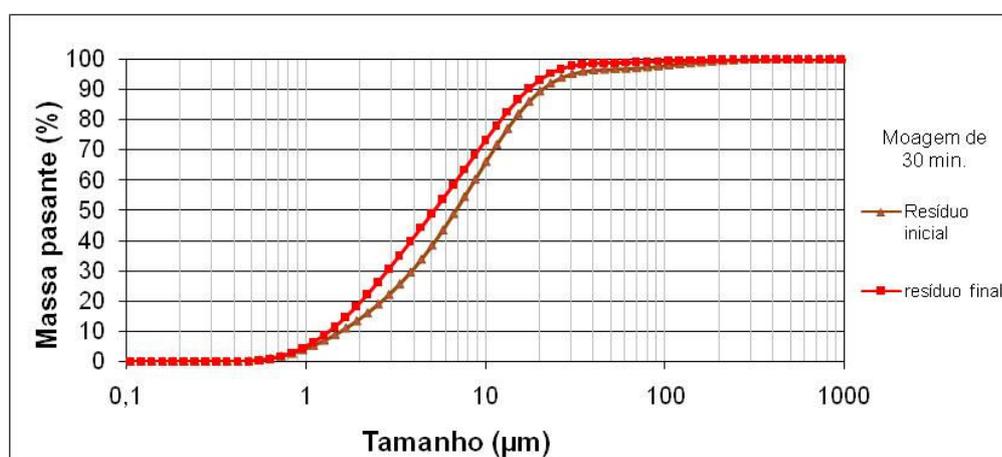


Figura 56 – Curvas granulométricas do resíduo de vidro com 30 minutos de moagem: obtida durante o estudo de moagem (resíduo inicial) e obtida com reprodução da amostra para aplicação (resíduo final).

A tabela 11 apresenta as comparações entre dados obtidos pela granulometria a laser da amostra final do resíduo (lote produzido para aplicação em toda a pesquisa) e da amostra inicial (obtida durante a análise prévia de moagem), onde os resíduos de vidro final apresentaram diâmetro médio (D_{50}) em torno de 5,2 μm , já a amostra inicial apresenta,

aproximadamente, D_{50} de 6,8 μm . São também listadas as características referentes à curva de granulometria, como o coeficiente de não uniformidade (C_{nu}), massa específica e superfície específica do resíduo moído.

Tabela 11 - Características do resíduo de vidro produzido para a aplicação nas pastas e argamassas de cimento Portland.

Característica	Resíduo de vidro inicial	Resíduo de vidro final
D_{10} (μm)	1,56	1,34
D_{50} (μm)	6,81	5,15
D_{90} (μm)	20,59	17,16
C_{nu}	5,59	4,93
Massa específica (kg/m^3)	-	2335
Superfície específica (m^2/kg) (Granulómetro)	1590,0	1900,0
Superfície específica (m^2/kg) (Blaine)	-	1003,4

A curva granulométrica mostra-se bem distribuída, comparada com a análise inicial que se fez durante o estudo prévio, obteve-se ao final um coeficiente de não uniformidade do lote (C_{nu}) igual a 4,93. O lote final do resíduo apresenta-se com massa específica de 2,34 g/cm^3 e superfície específica elevada de 19000 cm^2/g (determinada pelo analisador de partículas). Porém, segundo análise no aparelho Blaine, a superfície específica do resíduo de vidro foi de 10034 cm^2/g . Devido as diferenças entre de área superficial, admite-se o ensaio de Blaine, sendo que estudos mais específicos entre os aparelhos devem ser realizados. A elevada superfície de 10034 cm^2/g leva ao fato do resíduo apresentar um volume bem maior que o cimento e, também, uma possível necessidade de aumento da demanda d'água na mistura.

Fazendo comparação entre as curvas granulométricas do resíduo de vidro moído (RVM) e do cimento Portland, pode-se observar que o resíduo de vidro encontra-se com os tamanhos de partículas menores que o CPI utilizado, como mostra a figura 57. O que pode contribuir para o preenchimento de possíveis vazios entre os grãos de cimento e proporcionar um efeito filer pelo resíduo de vidro.

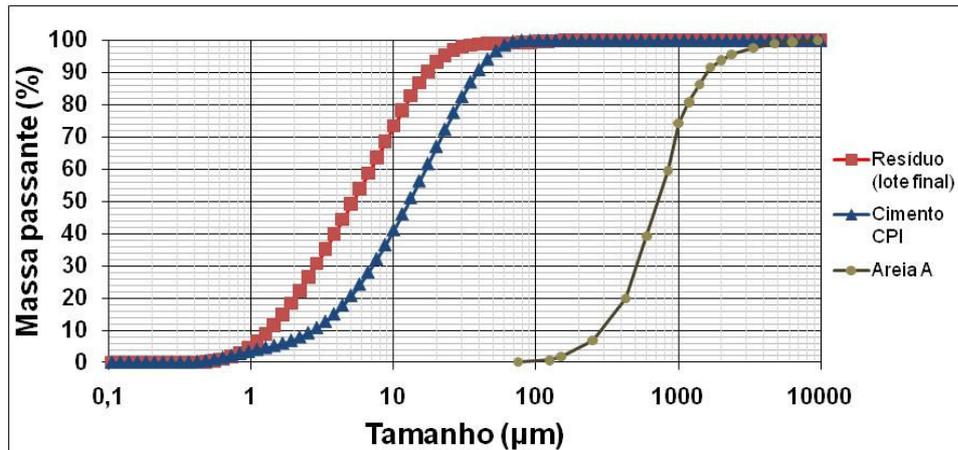


Figura 57 – Comparação entre as curvas granulométricas do resíduo de vidro, cimento Portland e areia A.

5.3.3 Microscopia ótica, difração de raios X e composição química.

A figura 58, gerada pelo MEV, mostra a estrutura morfológica do RVM (resíduo inicial), apresentando-se como um material granular de partículas com tamanhos variados e de geometria irregular (ver Apêndice D).

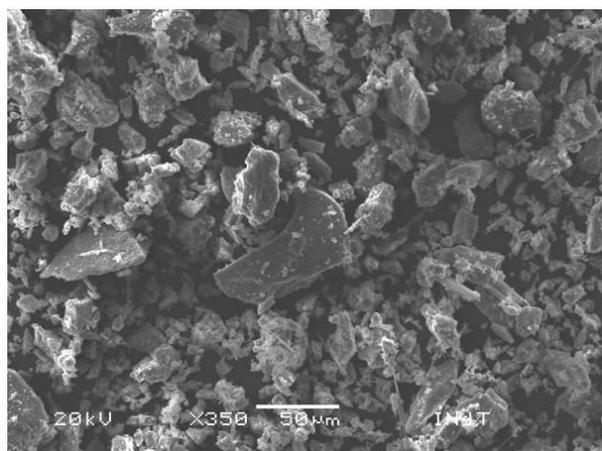


Figura 58 – Morfologia das partículas de RVM (inicial) com aumento de 350 vezes.

Com a imagem do resíduo de vidro, obtida em microscópio ótico e visualizada na figura 59, foi possível observar apenas aglomerados de pó de vidro sem maiores percepções a respeito da morfologia da partícula. Isso se deve ao fato do material se apresentar com elevada finura.



Figura 59 – Microscopia ótica do resíduo de vidro com 10x de aumento.

Com relação à análise da difração de raios X, constatou-se que o resíduo é um material amorfo, pois apresentou um halo característico bastante largo, entre os ângulos de 18° a 35° , e sem picos de difração definidos (figura 60). Deve-se ressaltar que devido sua estrutura sem forma e desordenada, o resíduo torna-se um material propício às combinações e transformações com outros elementos.

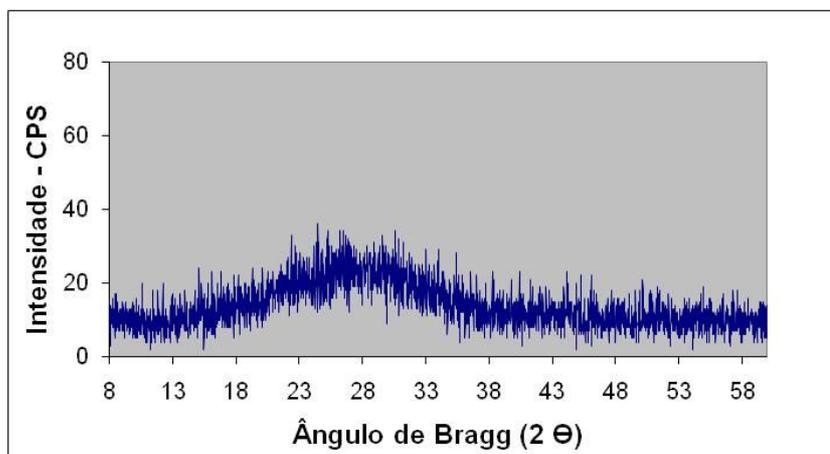


Figura 60 –Difratograma do resíduo de vidro.

Através da composição química realizada na amostra de vidro (tabela 12), classificou-se o resíduo como um vidro cálcico, devido a cal ser a segunda maior concentração (13,19% da quantidade de óxidos) e por estar isenta da presença de sódio.

Tabela 12 - Composição química (em massa) do resíduo de vidro.

Composto	Concentração
Dióxido de silício, SiO ₂	74,16
Óxido de cálcio, CaO	12,46
Óxido de magnésio, MgO	3,51
Óxido de alumínio, Al ₂ O ₃	1,60
Óxido de ferro, Fe ₂ O ₃	0,45
Óxido de potássio, K ₂ O	0,26
Perda ao fogo	7,56

5.3.4 Classificação e índice de atividade pozolânica

A NBR 12653/1992 estabelece exigências físicas e químicas para utilização de materiais como pozolanas. A única exigência física estipulada, para pozolanas, é a de que o material deve apresentar o máximo de 34% das partículas com diâmetro superior a 45 µm, sendo que o resíduo estudado apresentou 98,6% das partículas inferiores ao estipulado por norma, satisfazendo as exigências normativas.

Os critérios de classificação química da NBR 12653/1992 estabelecem que o somatório dos óxidos de SiO₂, Fe₂O₃, e Al₂O₃ deve ser igual ou superior a 70%. Neste caso, o resíduo apresentou um total de 74,76%, considerando o valor de perda ao fogo (PF) nos cálculos conjuntamente com os óxidos da composição química. Porém esta porcentagem sofre um aumento para 80,68% quando o teor de PF não é considerado no cálculo para fechar em 100% a composição química. Para as demais exigências desta norma, o resíduo se encontra dentro dos limites especificados, como mostra a tabela 13. Desta forma, segundo a norma, o resíduo de vidro pode então ser classificado como um material pozolânico classe N.

Tabela 13 - Parâmetros de classificação de materiais como pozolanas de acordo com a NBR 12653/1993.

Características	NBR 12653	Vidro moído
$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	70*	74,16
SO_3 (%)	4**	0
Teor de umidade (%)	3**	-
Perda ao fogo (%)	10**	7,56
Álcalis disponível em Na_2O (%)	1,5**	0

Notas: * valor mínimo; ** valor máximo.

Após a classificação, baseada nos critérios da NBR 12653/1992, o RVM foi avaliado mecanicamente, através do índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland. O valor de IAP obtido pela NBR 5752/1992, aos 28 dias de idade, foi de 104%, superior ao mínimo estabelecido por norma que é de 75%.

Em outros estudos com resíduos de vidro de lâmpadas, realizado por Shao *et al.* (1998), observou-se um valor do IAP de 96%. Nos estudos de Shi *et al.* (2005), o IAP encontrado foi de 116% e Lin *et al.* (2008) obtiveram valor de 89% para vidros de LCD. Estes valores estão entorno do IAP de 104% obtido para o resíduo de vidro moído do durante o tempo de 30 minutos. A figura 61 mostra as comparações do valor obtido do IAP com outros materiais, como cinza do bagaço da cana-de-açúcar, cinza da casca-de-arroz, cinza de lodo de esgoto, metacaulinita, cinza volante do resíduo sólido urbano, resíduo cerâmico e cinza volante.

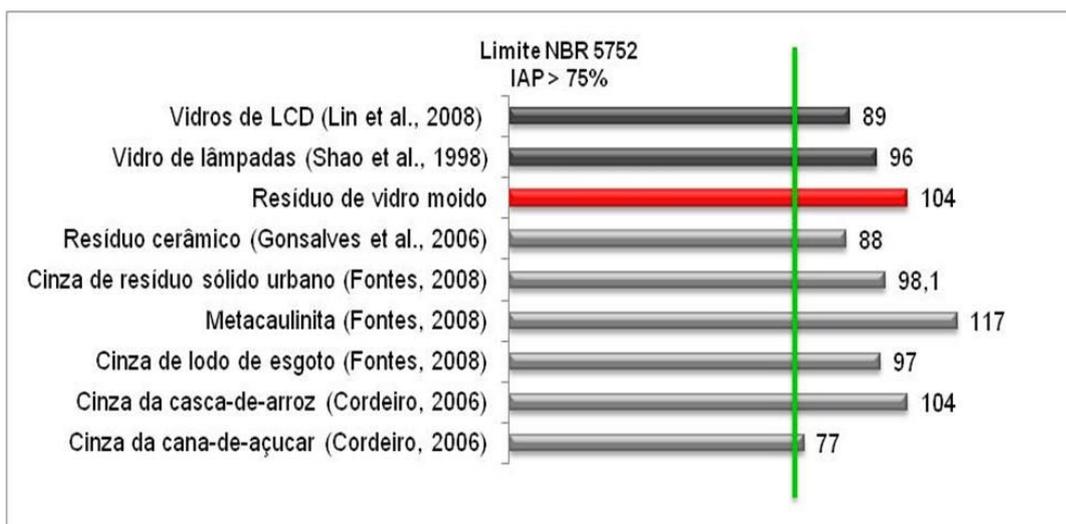


Figura 61 – Comparações entre índices de atividade pozolânica de aditivos minerais distintos.

5.4 Produção e caracterização das pastas

5.4.1 Compatibilidade entre o cimento Portland e o superplastificante e ponto de saturação do superplastificante.

Na figura 62 estão representadas as curvas do ensaio de cone Marsh para pastas cimento Portland CPI-32, água e o superplastificante Glenium 51 (SP), com características já descritas no item 3.2. Os resultados das curvas mostram proximidades entre as curvas, o que indica compatibilidade entre o cimento e o SP, seguido da diminuição do tempo de escoamento para os teores de sólidos do SP de 0,20 a 0,50%, onde, a partir deste último teor não se observou qualquer variação significativa no tempo de escoamento. Assim, o valor da dosagem de saturação entre o cimento e o SP foi de 0,50%.

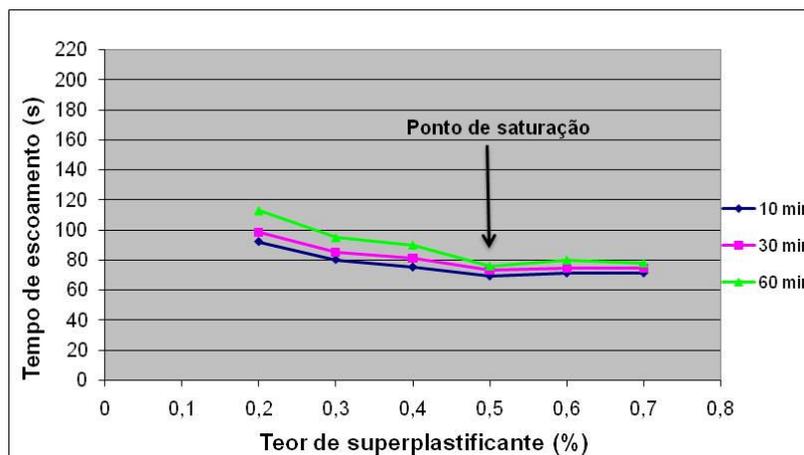
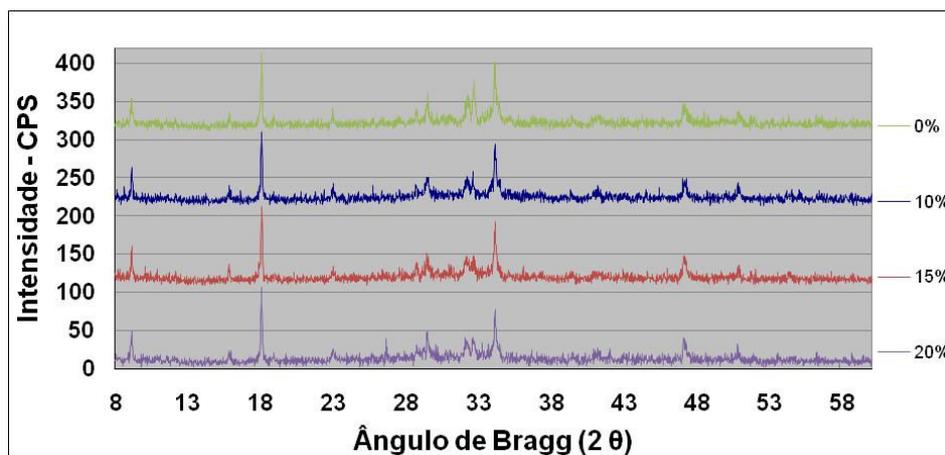


Figura 62 – Curvas de escoamento em cone Marsh para pastas com diferentes teores de aditivo superplastificante (teor de sólidos).

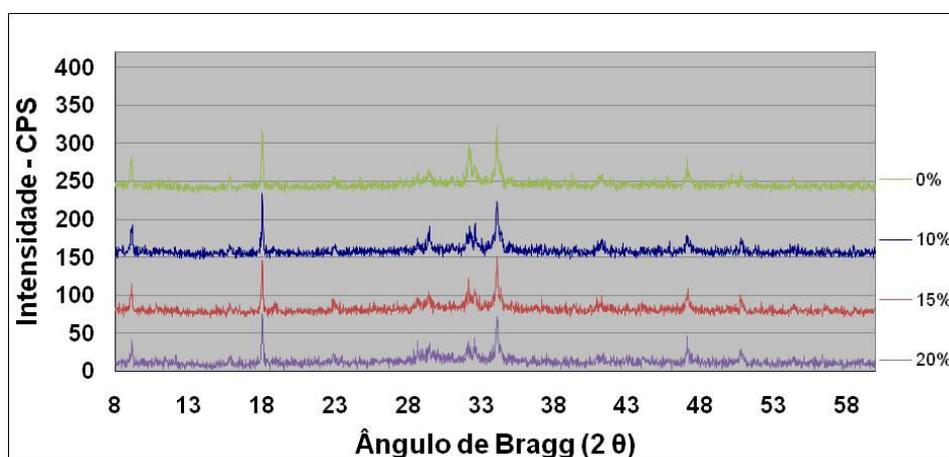
Para a produção das pastas com substituição parcial de cimento Portland por RVM, com cada teor de adição mineral, foram utilizados teores de SP diferentes para obtenção de uma mesma trabalhabilidade. Dessa maneira, para os teores de substituição do resíduo de 0, 10, 15 e 20%, as porcentagens de SP utilizadas foram, respectivamente, 0,10, 0,12, 0,14 e 0,16%, teores sempre abaixo do ponto de saturação encontrado. Estes teores de SP foram obtidos de forma que mantivessem as trabalhabilidades das misturas semelhantes, com a mesma relação água/aglomerante, o que facilita as comparações entre as pastas produzidas.

5.4.2 Difração de raios X

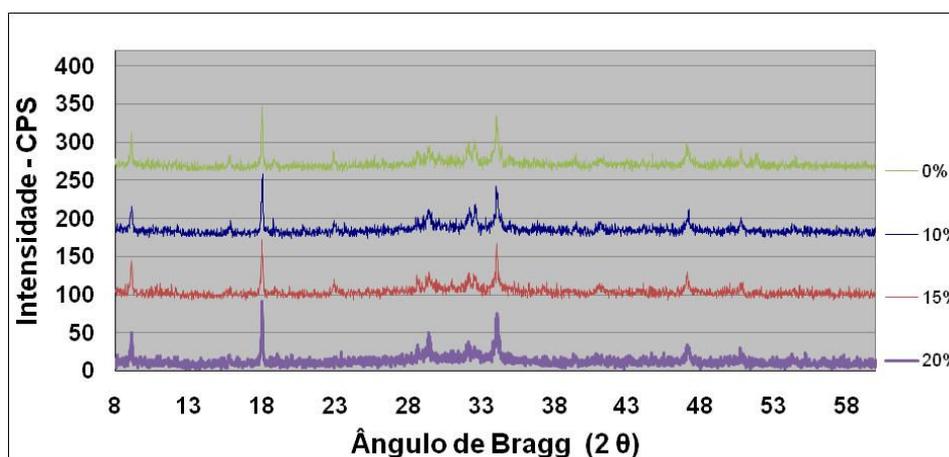
A figura 63 mostra o resultado de difração das pastas com teores de substituição diferentes do cimento por RVM, porém, com mesma idade. Através dos difratogramas pode-se identificar a presença de portlandita através picos de difração em $18,1^\circ$, $28,7^\circ$, $34,1^\circ$, $47,1^\circ$, e $50,8^\circ$ (CORDEIRO, 2006). Além disso, pode-se verificar a presença da etringita em $23,1^\circ$. É importante destacar a diminuição das fases de C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF entre as idades da pasta de referência, que pode ser observada entre os ângulos de 32° e 33° .



(a)



(b)



(c)

Figura 63 – Difratogramas das pastas com mesma idade e diversos teores: (a) aos 3 dias; (b) aos 7 dias e; (c) aos 28 dias.

Visualmente não foi constatada a redução do pico do CH, mas os valores de intensidade dos picos da portlandita diminuiram pouco aos 7 e 28 dias, no entanto, essas diminuições, no espectro, não são significativas. Todavia, a quantidade de cálcio adicionado à matriz, relativo à composição do vidro, deve ser levado em conta e pode contribuir para a não diminuição da intensidade do pico do hidróxido de cálcio durante o ensaio de difração. Ressalta-se que a técnica da difração de raios X é apenas qualitativa.

5.4.3 Análise termogravimétrica

A termoanálise também proporciona a avaliação do nível de hidratação das pastas de cimento Portland através das curvas TG e DTG. As figuras 64, 65, 66 e 67 apresentam estas curvas obtidas, as quais foram obtidas para a pasta de referência e para as pastas com substituição parcial do cimento por RVM nos teores de substituição de 10, 15 e 20% (ver Apêndice A).

A primeira perda de massa indicada por dois picos endotérmicos sobrepostos entre as temperaturas de 35 °C e 200 °C corresponde à perda de massa por desidratação dos silicatos de cálcio hidratado (tobermorita ou C-S-H) e dos trissulfoaluminatos de cálcio hidratados (etringita), originados com a hidratação do cimento.

A segunda perda de massa foi em torno de 400 °C e foi ocasionada pela perda de água quimicamente combinada com o hidróxido de cálcio (CH). Assim, quanto menor a intensidade do pico nesta temperatura menor a quantidade de CH na pasta. Em todas as idades de análise, pode-se observar uma pequena diminuição da intensidade deste pico (curvas de DTG) mediante o emprego do RVM. Esta redução pode ser atribuída a uma discreta atividade pozolânica desencadeada pelo resíduo de vidro e ao efeito de diluição (menor quantidade de cimento para um mesmo volume de pasta). A terceira perda de massa detectada ocorreu em torno de 650 °C, este pico é característico da decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃) presente na pasta.

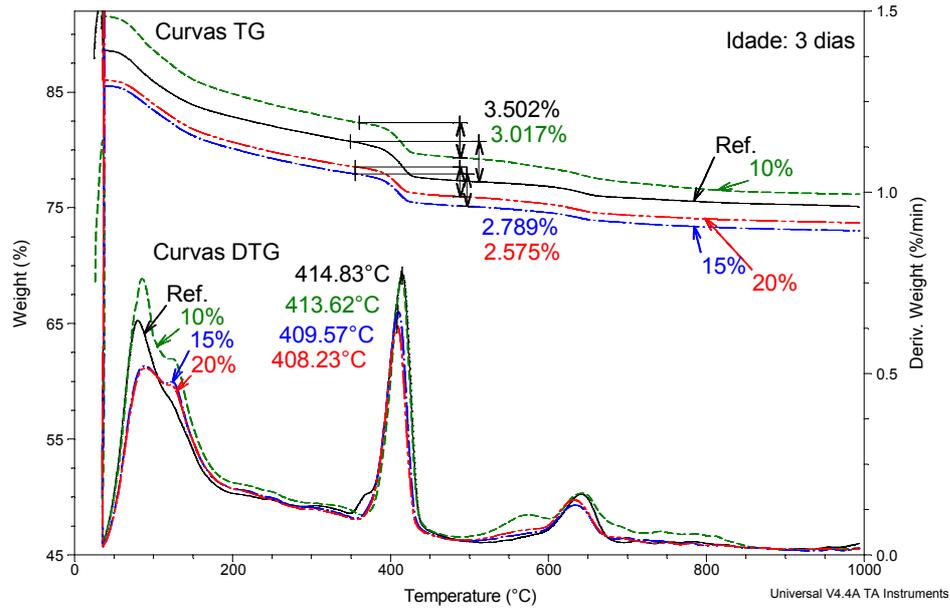


Figura 64 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 3 dias de idade.

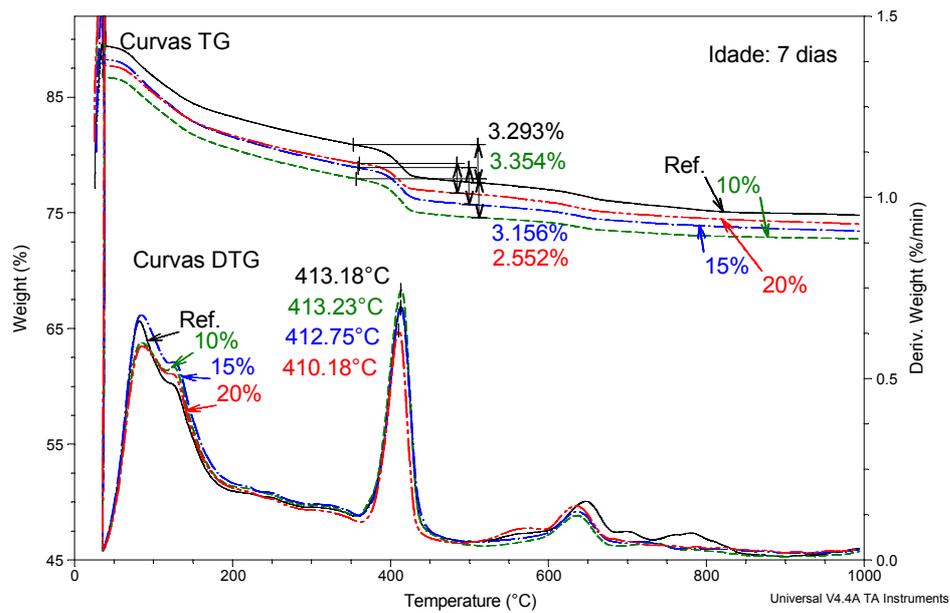


Figura 65 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 7 dias de idade.

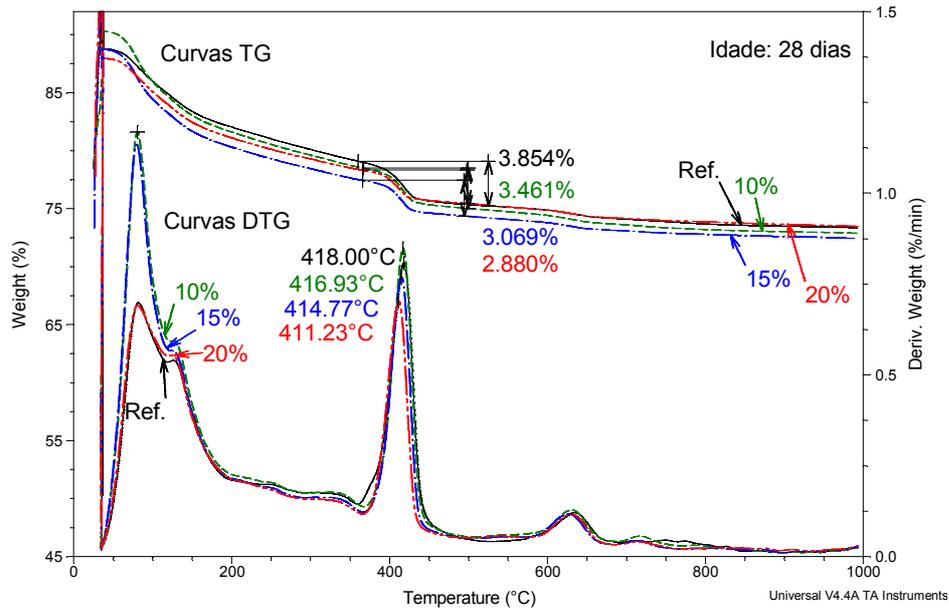


Figura 66 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 28 dias de idade.

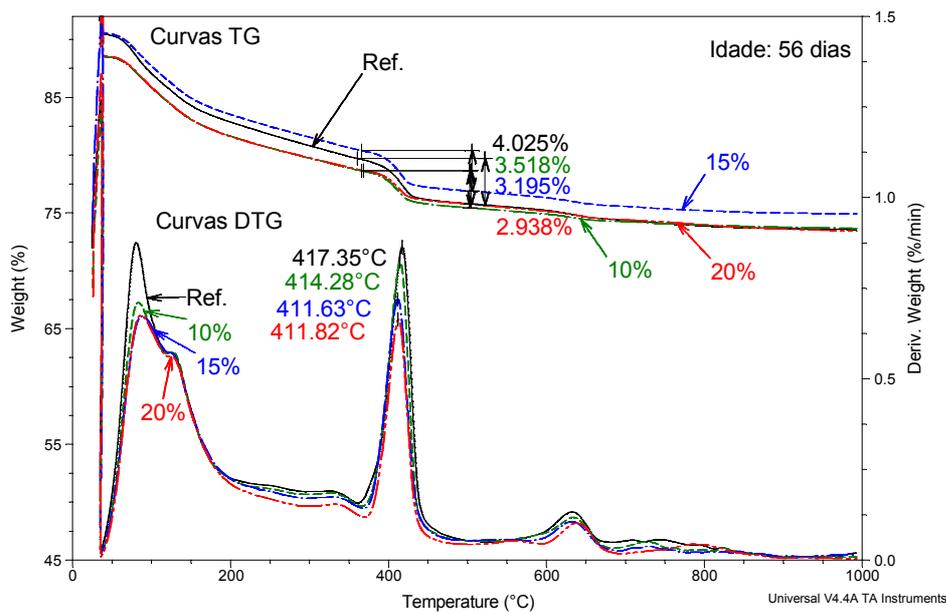


Figura 67 – Curvas TG/DTG das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro aos 56 dias de idade.

5.4.4 Quantidade quimicamente combinada com o hidróxido de cálcio

Por meio dos valores de perdas de massa detectadas nas curvas TG/DTG foi determinada a quantidade de hidróxido de cálcio nas pastas de cimento Portland e resíduo de vidro. Na figura 68 temos um resumo geral da água quimicamente combinada com o hidróxido de cálcio para as pastas com 10%, 15% e 20% de substituição do cimento por RVM (ver Apêndice B).

Aos três dias de idade pode-se notar que a pasta de referência apresentou 12,20% de hidróxido de cálcio, com o aumento do teor de resíduo de vidro este valor teve uma pequena redução (até 11,16%). Com 56 dias de idade a pasta de referência apresentou um valor de 12,73% de água quimicamente combinada com o CH, este valor passou a ser 11,07% com o emprego de 20% de resíduo de vidro. Tais resultados mostram uma queda da quantidade de portlandita, olhando isoladamente, aos 3 dias e 56 dias, o que parece ser um consumo de CH. Entretanto, a quantidade de CH reduz porque a quantidade de cimento diminui com o teor de substituição.

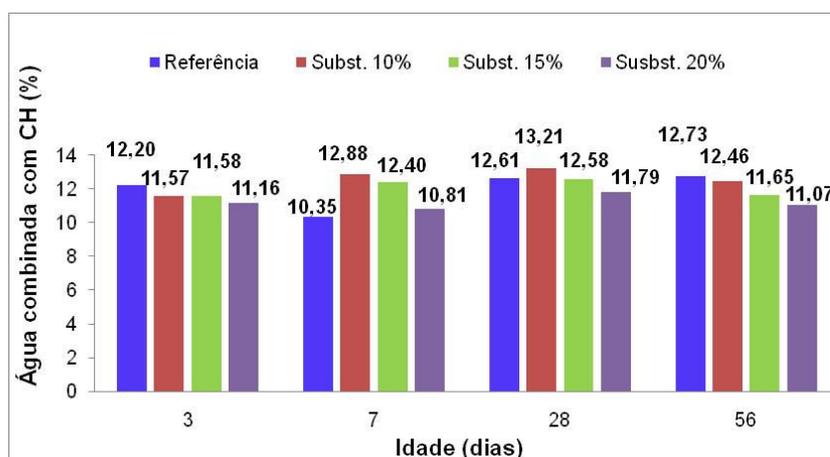


Figura 68 – Quantidade de água quimicamente combinada com o hidróxido de cálcio nas pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.

5.4.5 Resistência à compressão

Os ensaios mecânicos de resistência a compressão, em corpos-de-prova cilíndricos de pasta, estão apresentados na tabela 14, onde se podem verificar a tensão alcançada e seus respectivos desvios padrões, além da trabalhabilidade, obtida pelo espalhamento da pasta através do tronco de cone. Na figura 69 observa-se o modo de ruptura das pastas com suas respectivas adições, aos 28 dias de idade.

Tabela 14 – Valores de resistência à compressão e trabalhabilidade das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.

Mistura	Resistências à compressão (MPa) – Desvio padrão (MPa)				Trabalhabilidade / espalhamento
	3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	
Referência	48,85 ± 0,48	53,14 ± 1,53	65,55 ± 2,82	68,51 ± 2,87	276 ± 20 mm
10%	39,90 ± 1,38	48,61 ± 1,28	59,37 ± 3,98	63,79 ± 3,54	288 mm
15%	37,65 ± 0,90	44,84 ± 1,86	61,81 ± 3,69	68,99 ± 1,24	273 mm
20%	35,6 ± 1,19	44,50 ± 0,65	58,37 ± 2,56	65,26 ± 4,92	266 mm

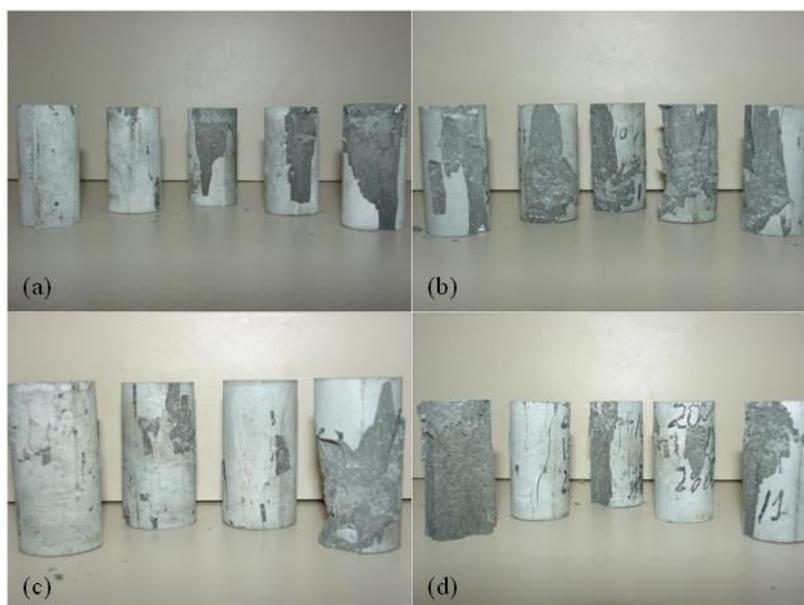


Figura 69– Amostras de pastas rompidas à compressão: (a) referência; (b) substituição 10% de RVM; (c) substituição 15% de RVM e; (d) substituição 20% de RVM.

Na figura 70, estão dispostos graficamente os resultados resistência à compressão das pastas produzidas. Como o esperado, houve aumento de tensão na matriz com a evolução da idade em todos os teores com RVM, sem quaisquer danos que seriam provocados por uma possível reação álcali-sílica.

Os resultados da pasta de referência (0%) aos 7 dias apresentaram um aumento de 8,07% em relação aos 3 dias de idade. Aos 28 dias, este valor de 18,93% em relação dos 7 dias, seguida de acréscimo 4,32% de 28 para 56 dias de idade. Já para o teor de 10% de RVM, observa-se um aumento de 21,83% aos 7 dias, seguida de 22,14% aos 28 dias e 7,44% com 56 dias. Com 15% do aditivo mineral, obtém-se 19,10% de acréscimo na resistência aos 7 dias, acompanhado de 37,85% deste último até os 28 dias e 11,62% na idade de 56 dias. Ao se utilizar o teor de 20% de RVM, o valor de resistência evoluiu de uma idade a outra, com avanço de 25,00% aos 7 dias, 31,17% aos 28 dias e 11,80% ao chegar em 56 dias.

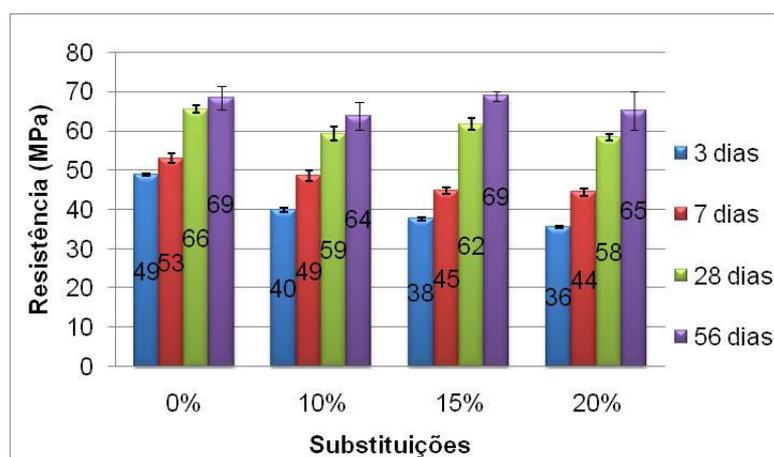


Figura 70 – Resistência à compressão das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro, agrupados de acordo com o teor de resíduo.

Através de estudos estatísticos realizados por análise de variância (ANOVA), utilizando o teste de médias de Tukey e ao nível de 5% de probabilidade, foram obtidas comparações estatísticas de resistência à compressão entre as idades de rompimento para um mesmo teor de substituição do RVM em pastas, como mostra a tabela 16.

O aumento de resistência pode estar associado com um possível refinamento dos poros das pastas e, devido sua finura, o RVM pode estar agindo como ponto de nucleação. Todavia ao analisarmos os ganhos de resistência dos 3 aos 28 dias e dos 3 aos 28 dias (tabela 15),

observamos que, em geral, o aumento de resistência com os teores de substituição são maiores que as resistências da referência, mostrando que existe uma atividade pozolânica do RVM.

Tabela 15 – Ganho de resistência de pastas entre idade inicial (3 dias) e final (28 e 56 dias).

Mistura	Resistência a compressão (MPa)	
	Δ_{3-28} dias	Δ_{3-56} dias
Referência	16,87	19,66
10%	19,47	23,89
15%	24,16	31,34
20%	22,77	29,66

Tabela 16 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão, com relação ao teor de substituição do cimento por resíduo de vidro.

Mistura	Idade (dias)	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
Referência	3	48,85	-	-
	7	53,14	-4,29	Não
	28	65,55	-16,70	Sim
	56	68,51	-19,66	Sim
	7	53,14	-	-
	28	65,55	-12,41	Sim
	56	68,51	-15,37	Sim
	28	65,55	-	-
Subst. 10%	56	68,51	-2,97	Não
	3	39,90	-	-
	7	48,61	-8,71	Sim
	28	59,38	-19,48	Sim
	56	63,79	-23,89	Sim
	7	48,61	-	-
	28	59,38	-10,77	Sim
	56	63,79	-15,18	Sim
Subst. 15%	28	59,38	-	-
	56	63,79	-4,42	Não
	3	37,65	-	-
	7	44,85	-7,19	Sim
	28	61,81	-24,16	Sim
	56	68,99	-31,34	Sim
	7	44,85	-	-

	28	61,81	-16,97	Sim
	56	68,99	-24,15	Sim
	28	61,81	-	-
	56	68,99	-7,18	Sim
	3	35,60	-	-
	7	44,50	-8,90	Sim
	28	58,37	-22,78	Sim
	56	65,26	-29,67	Sim
Subst. 20%	7	44,50	-	-
	28	58,37	-13,88	Sim
	56	65,26	-20,77	Sim
	28	58,37	-	-
	56	65,26	-6,89	Sim

De acordo com a ANOVA, o teor de 0% de substituição (referência) não possui diferenças significativas entre as idades de 3 e 7 dias, ocorrendo o mesmo entre as idades de 28 e 56 dias. Porém, existem diferenças ao se comparar valores de 3 ou 7 dias com as idades de 28 e 56. Para o teor de 10% de substituição, só não existe diferença estatística significativa entre as idades de 28 e 56 dias. As demais idades são tidas como diferentes pela análise de variância. A ANOVA para os teores de 15% e 20% mostram que os resultados da evolução das idades (3, 7, 28 e 56 dias), para cada teor, são diferentes entre si.

Para uma melhor comparação entre os teores e a resistência à compressão, os resultados são apresentados na figura 71 e dispõem de uma melhor visualização para comparações entre as mesmas idades dos teores trabalhados nas pastas de cimento Portland.

Na tabela 17 estão relacionados os valores de resistência média de compressão para a avaliação estatística para cada teor com as mesmas idades de hidratação.

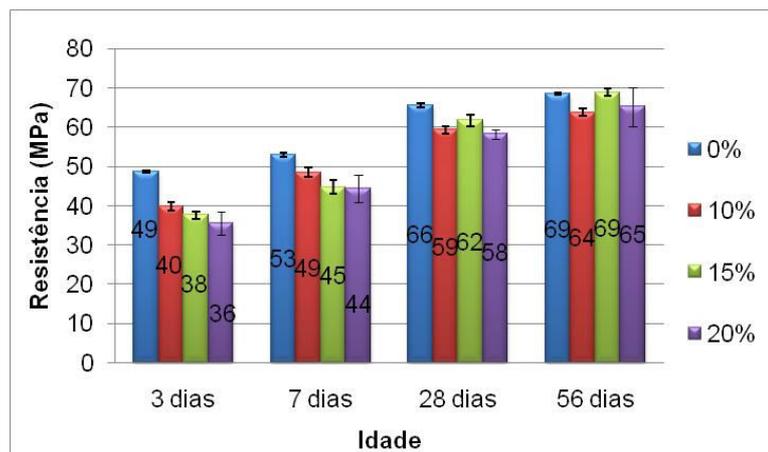


Figura 71 – Resistência à compressão das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro, agrupados de acordo com a idade de rompimento.

Tabela 17 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão, com relação a idade de rompimento dos corpos-de-prova.

Idade	Mistura	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
3 dias	Referência	48,85	-	-
	Subst. 10%	39,90	8,95	Sim
	Subst. 15%	37,65	11,20	Sim
	Subst. 20%	35,60	13,26	Sim
	Subst. 10%	39,90	-	-
	Subst. 15%	37,65	2,25	Sim
	Subst. 20%	35,60	4,31	Sim
	Subst. 15%	37,65	-	-
7 dias	Subst. 20%	35,60	2,06	Não
	Referência	53,14	-	-
	Subst. 10%	48,61	4,53	Sim
	Subst. 15%	44,85	8,30	Sim
	Subst. 20%	44,50	8,65	Sim
	Subst. 10%	48,61	-	-
	Subst. 15%	44,85	3,77	Sim
	Subst. 20%	44,50	4,12	Sim
28 dias	Subst. 15%	44,85	-	-
	Subst. 20%	44,50	0,35	Não
	Referência	65,55	-	-
	Subst. 10%	59,38	6,17	Não
	Subst. 15%	61,81	3,73	Não
56 dias	Subst. 20%	58,37	7,18	Sim
	Subst. 10%	59,38	-	-

	Subst. 15%	61,81	-2,44	Não
	Subst. 20%	58,37	1,01	Não
	Subst. 15%	61,81	-	-
	Subst. 20%	58,37	3,44	Não
56 dias	Referência	68,51	-	-
	Subst. 10%	63,79	4,72	Não
	Subst. 15%	68,99	-0,48	Não
	Subst. 20%	65,26	3,25	Não
	Subst. 10%	63,79	-	-
	Subst. 15%	68,99	-5,20	Não
	Subst. 20%	65,26	-1,47	Não
	Subst. 15%	68,99	-	-
	Subst. 20%	65,26	3,73	Não

Avaliando a evolução dos teores por idade, observa-se que aos 3 dias a pasta de referência apresentou 48,85 MPa, enquanto para as substituições de 10%, 15% e 20%, os valores de resistência mostram-se abaixo da matriz de referência, sendo respectivamente, 39,90 MPa, 37,65 MPa e 35,60 MPa, o que representa, consecutivamente, um decréscimo de 18,32%, 22,93% e 27,12%. Observando-se a mesma ordem de disposição anterior, aos 7 dias a pasta de referência apresentou 53,14 MPa e os demais teores de substituição continuaram inferiores, com média de 48,61 MPa (10%), 44,84 MPa (15%) e 44,50 MPa (20%), o que exprime uma diferença de 8,52%, 15,61% e 16,26%.

Aos 28 dias as resistências das pastas atingem os valores de 65,55 MPa, 59,37 MPa, 61,81 MPa, e 58,37 MPa (referência, 10%, 15% e 20%), o que remete a uma diminuição de 9,43%, 5,71%, 10,95%, em relação ao valor de referência de mesma idade. Agora aos 56 dias temos 68,51 MPa para a referência e, para os demais teores respectivos de 10%, 15% e 20%, temos 63,79 MPa (diminuição de 6,89%), 68,99 MPa (aumento de 0,70%) e 65,26 MPa (diminuição de 4,74%).

Estes valores demonstram que, conforme as idades avançam, ocorre um aumento da resistência, e as diferenças existentes entre os teores começa a decrescer, principalmente quando se observa a idade de 56 dias.

Ao analisar a tabela 18, onde se tem o ganho de resistência em cada idade, observa-se que para os teores de substituição, esses aumentos entre idades foram superiores à pasta de referência, demonstrando novamente a existência de pozolanicidade do RVM.

Tabela 18 – Ganho de resistência das pastas entre idades.

Mistura	Resistência a compressão (MPa)		
	$\Delta_{3-7 \text{ dias}}$	$\Delta_{7-28 \text{ dias}}$	$\Delta_{28-56 \text{ dias}}$
Referência	4,29	12,41	2,96
10%	8,71	10,76	4,42
15%	7,19	16,97	7,18
20%	8,90	13,87	6,89

Uma melhor análise das resistências entre teores com a mesma idade foram realizados com a ANOVA. Assim, os dados mostram que aos 3 dias de idade não existe diferença entre os teores de 15% e 20%, já os demais teores para esta mesma idade são significativamente distintos. O mesmo resultado ocorre com a idade de 7 dias, que não apresenta diferença expressiva aos 15% e 20%.

O quadro estatístico começa a mudar quando se chega aos 28 dias de idade, onde apenas as pastas de referência e o teor de 20% são expressivamente diferentes e o comparativo entre os demais teores mostram-se similares. Com 56 dias, de acordo com a análise de variância, todos os resultados obtidos com os diversos teores mostram-se semelhantes. Os resultados de aumento da resistência permanecem, de certa forma, compatíveis com os dados de hidróxido de cálcio que foram consumidos aos 28 e 56 dias de idades, conforme mostrado na figura 68.

O comportamento dos resultados de resistência das pastas com RVM mostraram-se parecidos com os encontrados por Karamberi *et al.* (2006), estes autores realizaram ensaios de resistência em pastas de cimento com vidros finamente moídos e encontraram resultados satisfatórios com substituição parcial de 5% e 10% do cimento, para vidros coloridos e brancos aos 28 dias, entretanto os vidros brancos apresentaram valor de resistência um pouco abaixo da pasta de referência.

5.4.6 Porosimetria por intrusão de mercúrio

No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio aos 28 dias (ver Anexo B), das pastas produzidas, foram avaliadas as distribuições dos mesoporos e macroporos, através de curva que correlaciona o diâmetro do poro e o volume de mercúrio introduzido (figura 72).

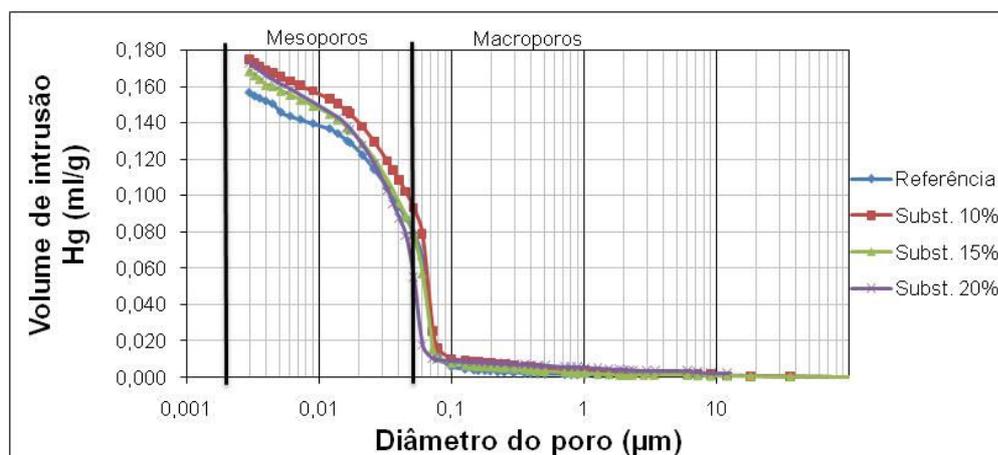


Figura 72 – Distribuição dos tamanhos de poros das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.

De maneira geral, verifica-se através da tabela 19 que, as pastas apresentam um aumento de porosidade total de até 9,36%, à medida que se eleva o teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro. No entanto, verifica-se que as pastas produzidas com RVM apresentaram um refinamento de poros. Ocorreu, assim, uma redução em cerca de 8,61% e 37,23% do volume de macroporos das pasta com teor de resíduo de 15% e 20%, respectivamente. Ao contrário dos resultados anteriores, a pasta com teor de 10% de resíduo apresentou ligeiro acréscimo de 5,26% do volume de macroporos. Os refinamentos podem proporcionar melhorias das propriedades da matriz como a absorção por capilaridade, permeabilidade e a resistência mecânica (item 5.4.5). Estes resultados demonstram que um dos componentes responsáveis pelos aumentos das resistências obtidas com as pastas pode ser proveniente do refinamento dos poros.

Tabela 19 – Tamanhos de poros e porosidade das pastas de cimento Portland e resíduo de vidro.

Mistura	Microporo (%)	Mesoporo (%)	Macroporo (%)
	$\Phi < 0,002 \mu\text{m}$	$0,002 \mu\text{m} \leq \Phi \leq 0,05 \mu\text{m}$	$0,05 \mu\text{m} < \Phi$
Referência	0,00	49,26	50,74
Subst. 10%	0,00	46,59	53,41
Subst. 15%	0,00	53,12	46,88
Subst. 20%	0,00	68,15	31,85

5.5 Caracterização das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro

5.5.1 Resistência à compressão

Na tabela 20 são apresentados os resultados de resistência média à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de argamassa, com seus respectivos desvios padrões e os valores da medida de espalhamento através da mesa de abatimento.

Tabela 20 – Valores de resistência à compressão e trabalhabilidade das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.

Mistura	Resistências à compressão (MPa) – Desvio padrão (MPa)				Abatimento
	3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	
Referência	42,55 ± 0,25	42,33 ± 1,15	52,61 ± 0,98	52,19 ± 1,20	280 ± 20 mm
10%	37,61 ± 0,50	47,33 ± 1,29	50,70 ± 1,81	55,47 ± 1,06	286 mm
15%	37,63 ± 0,52	45,40 ± 0,86	52,16 ± 1,81	58,90 ± 0,44	295 mm
20%	36,80 ± 0,28	44,60 ± 0,95	59,78 ± 0,82	64,02 ± 0,74	296 mm

Os resultados apontam novamente um aumento de resistência entre as idades de 3 dias em relação a 28 e 56 dias (tabela 21). Como a argamassa apresenta uma maior porosidade devido à inserção da areia no sistema, esta melhoria de resistência se deve, principalmente, ao refinamento dos poros, o que será confirmado com os resultados do ensaio de absorção, sendo que o melhor refinamento ocorre com o teor de 20% de substituição. Na figura 73, observam-se os modos de ruptura dos corpos-de-prova de argamassa aos 28 dias de idade, com os teores trabalhados.

Tabela 21 – Ganho de resistência de argamassas entre idade inicial (3 dias) e final (28 e 56 dias).

Mistura	Resistência a compressão (MPa)	
	$\Delta_{3-28 \text{ dias}}$	$\Delta_{3-56 \text{ dias}}$
Referência	10,06	9,64
10%	13,09	17,86
15%	14,53	21,27
20%	22,98	27,22

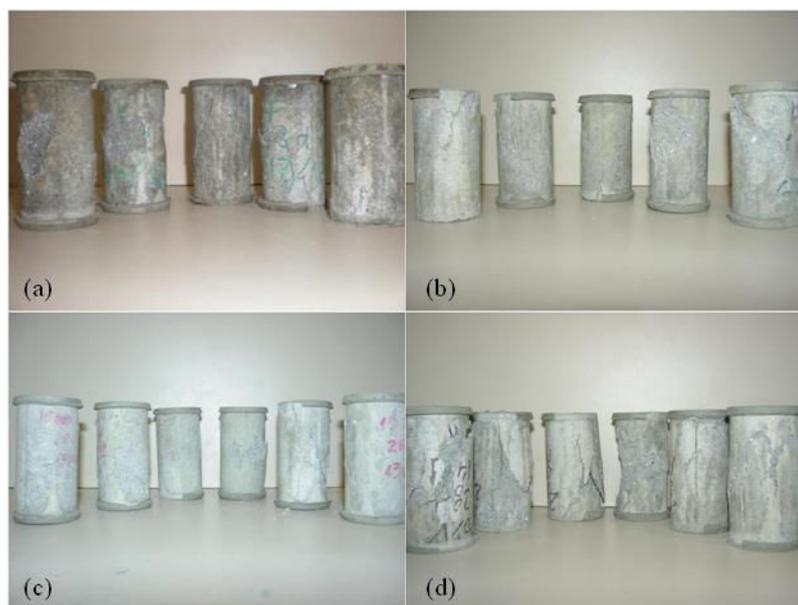


Figura 73 – Argamassas rompidas à compressão: (a) referência; (b) subst. 10% de RVM; (c) subst. 15% de RVM e; (d) subst. 20% de RVM.

O emprego da ANOVA mais uma vez é utilizada para verificação, ao nível de 5% de probabilidade, dos valores de resistência em relação as idades de rompimento. Ao se verificar a figura 74, aliada ao modelo probabilístico mostrado na tabela 22, observa-se que para o teor de 0% de substituição (referência), não se tem diferenças significativas entre as resistências das idades de 3 e 7 dias, o que ocorre também para as idades de 28 e 56 dias. Com o teor de 10%, 15 e 20% de substituição de cimento pelo RVM as resistências à compressão de todas as idades são significativamente diferentes.

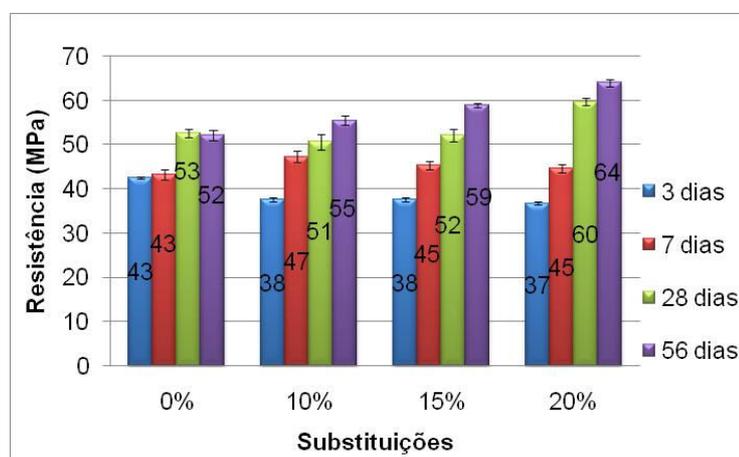


Figura 74 – Valores de resistência à compressão das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro, agrupados por teor de substituição.

Tabela 22 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão das argamassas de cimento Portland, com relação ao teor de substituição do cimento por resíduo de vidro.

Mistura	Idade	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
Referência	3	42,55	-	-
	7	43,33	-0,78	Não
	28	52,61	-10,06	Sim
	56	52,20	-9,65	Sim
	7	43,33	-	-
	28	52,61	-9,25	Sim
	56	52,20	-8,87	Sim
	28	52,61	-	-
Subst. 10%	3	37,61	-	-
	7	47,33	-9,72	Sim
	28	50,70	-13,09	Sim
	56	55,48	-17,87	Sim
	7	47,33	-	-
	28	50,70	-3,37	Sim
	56	55,48	-8,15	Sim
	28	50,70	-	-
Subst. 15%	3	37,63	-	-
	7	45,40	-7,77	Sim
	28	52,16	-14,53	Sim
	56	58,91	-21,27	Sim
	7	45,40	-	-
	28	52,16	-6,76	Sim
	56	58,91	-13,50	Sim
	28	52,16	-	-
Subst. 20%	3	36,80	-	-
	7	44,64	-7,84	Sim
	28	59,78	-22,98	Sim
	56	64,02	-27,22	Sim
	7	44,64	-	-
	28	59,78	-15,14	Sim
	56	64,02	-19,38	Sim
	28	59,78	-	-
	56	64,02	-4,24	Sim

Ao realizar uma comparação entre os gráficos de resistência à compressão das argamassas e das pastas, das figuras 74 e 70, verifica-se a mesma tendência de aumento das resistências.

Para verificação dos resultados à compressão entre os teores de uma mesma idade (figura 75), realizou-se a avaliação estatística descrita na tabela 23. Observa-se que, para os 3 dias de idade, a resistência da argamassa de referência é maior e significativamente diferente dos demais teores, no entanto, o teor de 10% e 15% são semelhantes. Já o teor de 20%, para essa mesma idade, é expressivamente maior que os teores de RVM 10% e 15%.

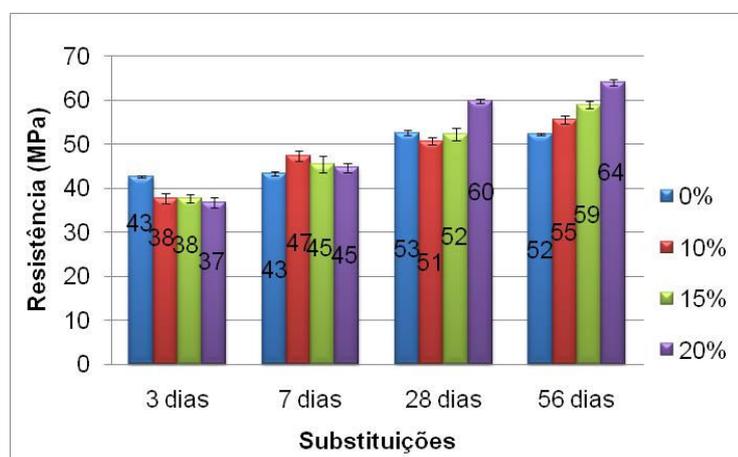


Figura 75 – Valores de resistência à compressão das argamassas de cimento Portland com resíduo de vidro, agrupados por idade de rompimento.

Aos 7 dias de idade, a resistência média da argamassa de referência é menor que as dos teores de 10% e 15% e, semelhante ao do teor de 20%, imediatamente este último teor apresenta um valor de resistência maior que o teor de 10%. Nesta mesma idade, tem-se ainda que, os teores de 10% e 15% de RVM são estatisticamente semelhantes, o que igualmente acontece entre os teores de 15% e 20%. Na idade de 28 dias apenas a resistência do teor de 20% é maior que os demais e não há diferença estatística entre os teores de referência, 10% e 15%. Já aos 56 dias, todos os valores de resistência são expressivamente diferentes e aumentam com a elevação da quantidade do teor de substituição.

Este aumento de resistência das argamassas assemelha-se com os estudos de Shi *et al.* (2004) que, também produziram argamassas com substituição parcial de 20% do cimento por

vidros com finura semelhante ao do CP e relação a/ag em torno de 0,48. As resistências com os resíduos obtidas pelos autores, aos 28 dias de idade, foram superiores (39 MPa), comparados com a argamassa de referência (35 MPa).

Os comportamentos gráficos das argamassas e pastas, mostrados nas figuras 75 e 71, são bem diferentes, talvez porque nas pastas o efeito de preenchimento seja bem menor do que nas argamassas, sobressaindo-se mais o efeito pozolânico do material. Já nas argamassas o efeito do preenchimento é dominante e, aliado ao baixo comportamento pozolânico, começando a atuar já aos 7 primeiros dias de idade.

Tabela 23 – Análise comparativa na evolução da resistência à compressão das argamassas de cimento Portland, com relação a idade de rompimento do corpo-de-prova.

Idade	Mistura	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
3 dias	Referência	42,54	-	-
	Subst. 10%	37,61	4,94	Sim
	Subst. 15%	37,63	4,92	Sim
	Subst. 20%	36,80	5,75	Sim
	Subst. 10%	37,61	-	-
	Subst. 15%	37,63	-0,02	Não
	Subst. 20%	36,80	0,81	Sim
	Subst. 15%	37,63	-	-
	Subst. 20%	36,80	0,83	Sim
	7 dias	Referência	43,33	-
Subst. 10%		47,33	-4,00	Sim
Subst. 15%		45,40	-2,07	Sim
Subst. 20%		44,64	-1,31	Sim
Subst. 10%		47,33	-	-
Subst. 15%		45,40	1,92	Sim
Subst. 20%		44,64	2,69	Sim
Subst. 15%		45,40	-	-
Subst. 20%		44,64	0,76	Não
28 dias		Referência	52,61	-
	Subst. 10%	50,70	1,91	Não
	Subst. 15%	52,16	0,45	Não
	Subst. 20%	59,78	-7,17	Sim
	Subst. 10%	50,70	-	-
	Subst. 15%	52,16	-1,46	Não
	Subst. 20%	59,78	-9,08	Sim

	Subst. 15%	52,16	-	-
	Subst. 20%	59,78	-7,62	Sim
	Referência	52,20	-	-
	Subst. 10%	55,48	-3,28	Sim
	Subst. 15%	58,91	-6,71	Sim
	Subst. 20%	64,02	-11,82	Sim
56 dias	Subst. 10%	55,48	-	-
	Subst. 15%	58,91	-3,43	Sim
	Subst. 20%	64,02	-8,54	Sim
	Subst. 15%	58,91	-	-
	Subst. 20%	64,02	-5,11	Sim

5.5.2 Módulo de elasticidade

Durante o ensaio de resistência à compressão, houve aquisição dos dados para gerar a curva tensão *versus* deformação para o cálculo do módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2003) e a ASTM C 469 (1994) e esses valores de módulo estão dispostos na tabela 24. Observa-se que a utilização do resíduo de vidro gera um aumento no módulo de elasticidade da matriz. À medida que se aumentam as porcentagens de substituição do cimento pelo RVM, o módulo também aumenta em 3,55%, 11,56% e 12,33%, quando se utiliza o método da NBR 8522/2003. Entretanto, pelo método da ASTM C 469/1994, o módulo aumenta gradualmente em 3,71%, 5,09% e 10,88%. Tais aumentos no módulo de elasticidade estão associados aos respectivos acréscimos de resistência obtidos no ensaio à compressão de argamassas.

Tabela 24 – Valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.

Teor	Resistência à compressão aos	Módulo de elasticidade (\pm Desv. padrão)	
	28 dias	Eci (NBR 8522/03)	Ec (ASTM C 469)
	MPa	GPa	GPa
Referência	52,61 \pm 0,98	32,36 \pm 0,29	31,27 \pm 0,27
Subst. 10%	50,70 \pm 1,81	33,12 \pm 1,26	32,18 \pm 0,82
Subst. 15%	52,16 \pm 1,81	34,41 \pm 2,53	31,89 \pm 0,17
Subst. 20%	59,78 \pm 0,82	35,84 \pm 0,72	34,48 \pm 0,37

As tabelas 25 e 26 mostram o resumo dos estudos estatísticos realizados para os módulos decorrentes segundo as metodologias da NBR 8522/2003 e da ASTM C 469/1994. A partir deste ponto de vista ao nível de probabilidade de 5%, no cálculo realizado pela NBR 8522/2003, e de acordo com a ANOVA, não existem diferença significativa do módulo de elasticidade entre os teores trabalhados. Já com o resultado obtido pela ASTM C 469, a diferença está no teor de substituição de 20% para com os demais teores, sendo todos os outros idênticos entre si.

Tabela 25 –Análise comparativa do módulo de elasticidade das argamassas de cimento Portland, segundo a NBR 8522/2003.

Idade	Mistura	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
28 dias	Referência	32,357	-	-
	Subst. 10%	33,122	-0,765	Não
	Subst. 15%	34,414	-2,057	Não
	Subst. 20%	35,836	-3,479	Não
	Subst. 10%	33,122	-	-
	Subst. 15%	34,414	-1,292	Não
	Subst. 20%	35,836	-2,714	Não
	Subst. 15%	34,414	-	-
Subst. 20%	35,836	-1,422	Não	

Tabela 26 –Análise comparativa do módulo de elasticidade das argamassas de cimento Portland, segundo a ASTM.

Idade	Mistura	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
28 dias	Referência	31,267	-	-
	Subst. 10%	32,180	-0,913	Não
	Subst. 15%	31,890	-0,623	Não
	Subst. 20%	34,475	-3,208	Sim
	Subst. 10%	32,180	-	-
	Subst. 15%	31,890	0,291	Não
	Subst. 20%	34,475	-2,295	Sim
	Subst. 15%	31,890	-	-
Subst. 20%	34,475	-2,585	Sim	

A curva média tensão *versus* deformação aos 28 dias de idade, obtida através da aquisição de dados, é observada na figura 76. É nítido o melhor comportamento mecânico da argamassa com 20% de RVM tanto na análise da tensão máxima quanto com relação ao módulo de elasticidade. Para Dal Molin (2005), as características superiores da zona de transição na presença de adições minerais não são suficientes para causar uma melhora correspondente no módulo da matriz, para a qual as características do agregado se tornam o fator limitante. Conseqüentemente, os aumentos de nos níveis de resistência à compressão obtidos com as adições não se reproduzem com a mesma intensidade nos valores de módulo, que aumenta de forma mais amena. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a zona de transição tem um papel importante na relação tensão-deformação da matriz, pois os vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são mais comuns na interface do que na matriz da pasta, além de existir a possibilidade do efeito de densificação ser mais preponderante na relação tensão-deformação do que na resistência à compressão quando se utiliza aditivos minerais. O fato é que a utilização de aditivos minerais pode melhorar a densificação da zona de transição e oferecer melhoras no módulo da matriz. Contudo, diversos fatores contribuem para o módulo de elasticidade da matriz, como o próprio módulo da pasta de cimento; o módulo do agregado conjuntamente com suas características e propriedades de forma, textura, dimensão, distribuição e composição mineral e; os parâmetros de ensaio adotados (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

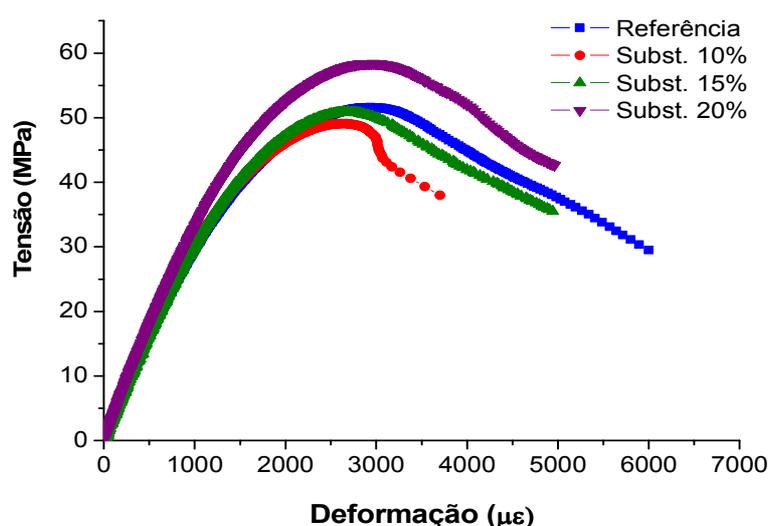


Figura 76 – Valores de tensão e deformação das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.

5.5.3 Absorção total, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade

A incorporação de RVM nas argamassas diminuiu a absorção por imersão total (A) na faixa de 8,70 a 17,90% e o índice de vazios (Iv) entre 9,12 a 16,69%, decorrentes do aumento do teor de substituição do aditivo mineral, como pode ser observado na figura 77 (ver Apêndice C, tabela C.01). Os índices de vazios confirmam a hipótese esperada do aumento das resistências nas argamassas provenientes do refinamento dos poros, que foi proporcionado pelo resíduo. Em contrapartida, os valores de massa específica são reduzidos com o aumento do teor de aditivo mineral, no entanto, para o teor de 20%, a massa específica foi a mesma da argamassa de referência, o que pode comprovar a maior compactidade da argamassa com maior teor de RVM, uma vez que este material apresentar massa específica inferior a do cimento Portland estudado.

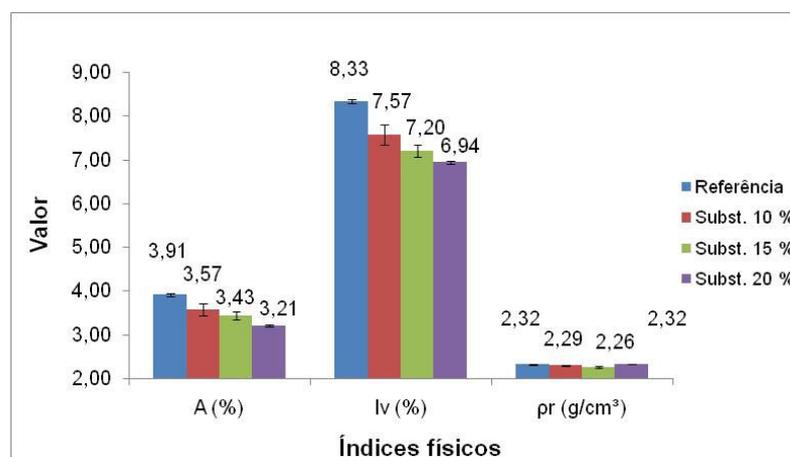


Figura 77 – Valores de absorção total, índice de vazios e massa específica das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.

Para o ensaio de absorção por capilaridade, observando-se a figura 78 (ver Apêndice C, tabela C.02), pode-se notar que os teores de substituição do cimento pelo resíduo apresentaram uma diminuição da quantidade de água absorvida - relativa à área de contato dos corpos-de-prova com a lâmina d'água - bastante significativa em relação ao parâmetro de referência.

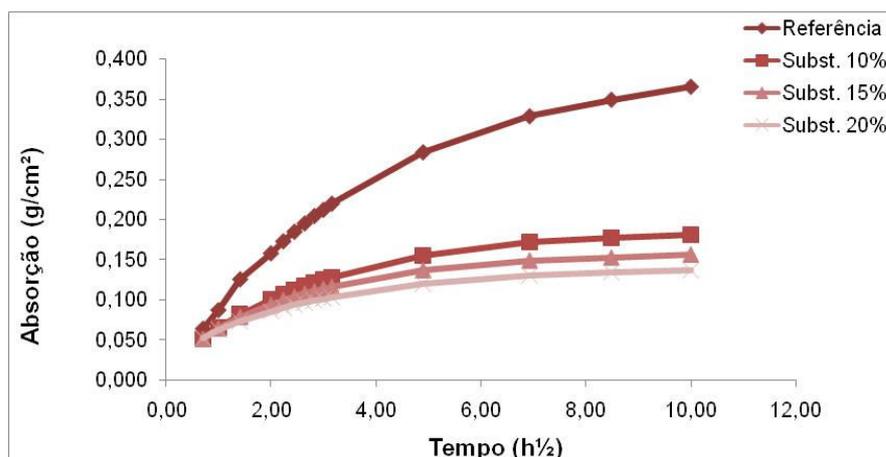


Figura 78 – Valores de absorção capilar das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.

A tabela 27 apresenta resultados do ensaio de absorção total de água e absorção por capilaridade. O índice de vazios diminuiu com o aumento do teor de substituição do cimento pelo RVM, o que está de conformidade com o aumento da resistência à compressão. Segundo a ANOVA, o teste de Tukey ($p < 0,05$) mostra que os valores médios do índice de vazios entre a argamassa de referência e os teores de 10%, 15% e 20% de RVM, apresentam diferenças significativas entre si, no entanto, isso não acontece para entre os teores de 15% e 20% (tabela 29). Os valores de massa específica mostram uma queda quando se utilizam 10% e 15% do RVM, salvo o teor de 20%, onde se verifica uma elevação do valor em relação ao de referência. Todavia, o teste de Tukey mostra que os resultados de massa específica obtidos entre 10%, 15% e 20% são estatisticamente diferentes entre si, e que apenas o teor de 15% é diferente do valor da argamassa de referência. Na absorção total, de acordo com a análise de variância, os teores de substituição obtiveram valores inferiores comparados com a argamassa de referência, essa diminuição ocorre à medida que se elevam as proporções do teor de substituição. Porém, os teores de 10% e 15% apresentaram valores de absorção total semelhantes estatisticamente entre si (tabela 28).

Tabela 27 – Índices físicos das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro.

Características	Referência	Resíduo de vidro moído		
		10%	15%	20%
Índice de vazios (%)	8,33 ± 0,05	7,57 ± 0,23	7,20 ± 0,15	6,94 ± 0,04
Massa específica (kg/m ³)	2322,30	2293,46	2259,73	2323,66
Absorção total após 72 h (%)	3,91 ± 0,03	3,57 ± 0,14	3,43 ± 0,09	3,21 ± 0,02
Absorção capilar após 72 h (kg/m ²)	3,48 ± 0,04	1,76 ± 0,00	1,53 ± 0,11	1,34 ± 0,10
Absorção capilar após 100 h (kg/m ²)	3,65 ± 0,06	1,80 ± 0,00	1,56 ± 0,11	1,33 ± 0,04

A absorção capilar das argamassas foi realizada com intervalos de medição em até 72 h (prescrito por ABNT) e, também, com até 100 h. Na análise de resultados adotou-se o tempo de medição depois de decorridas 100 h, assim, observou-se que a absorção por capilaridade da argamassa de referência apresentou valor de 0,3647 g/cm², sendo que, o teor de 10% de RVM apresentou absorção de 0,1801 g/cm² (diminuição de 51,62%), já com o teor de 15% de RVM a absorção reduziu para 0,1562 g/cm² e o RVM com 20% teve valor de 0,1372 g/cm², o que significa uma redução de 57,17% e 63,38, respectivamente, comparados à argamassa de referência. Essa absorção capilar mostra um consenso com a absorção total, índice de vazios e resistência à compressão das argamassas.

Tabela 28 – Análise comparativa na da absorção total das argamassas de cimento Portland.

Idade	Mistura	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
28 dias	Referência	3,913	-	-
	Subst. 10%	3,571	0,342	Sim
	Subst. 15%	3,434	0,479	Sim
	Subst. 20%	3,210	0,703	Sim
	Subst. 10%	3,571	-	-
	Subst. 15%	3,434	0,137	Não
	Subst. 20%	3,210	0,362	Sim
	Subst. 15%	3,434	-	-
	Subst. 20%	3,210	0,224	Sim

Tabela 29 – Análise comparativa na da índice de vazios das argamassas de cimento Portland.

Idade	Mistura	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
28 dias	Referência	8,330	-	-
	Subst. 10%	7,557	0,773	Sim
	Subst. 15%	7,200	1,130	Sim
	Subst. 20%	6,937	1,393	Sim
	Subst. 10%	7,557	-	-
	Subst. 15%	7,200	0,358	Sim
	Subst. 20%	6,937	0,620	Sim
	Subst. 15%	7,200	-	-
	Subst. 20%	6,937	0,263	Não

Segundo a ANOVA ($p < 0,05$), as absorções por capilaridade das argamassas produzidas se diferenciam (tabela 30), sendo que, as produzidas com RVM apresentam valor menor que a de referência e, quanto maior o teor de substituição, menor a absorção capilar. Este fato acontece tanto na análise do ensaio após as 72 h como com as de 100 h decorridas.

Tabela 30 – Análise comparativa na da absorção por capilaridade das argamassas de cimento Portland.

Idade	Mistura	Média (MPa)	Diferença entre as médias	Estatisticamente diferente
28 dias	Referência	0,365	-	-
	Subst. 10%	0,180	0,185	Sim
	Subst. 15%	0,156	0,208	Sim
	Subst. 20%	0,133	0,232	Sim
	Subst. 10%	0,180	-	-
	Subst. 15%	0,156	0,024	Sim
	Subst. 20%	0,133	0,047	Sim
	Subst. 15%	0,156	-	-
	Subst. 20%	0,133	0,023	Sim

Com os dados do ensaio de absorção por capilaridade, a absorvidade foi calculada em um primeiro estágio a partir de um comportamento linear (figura 79), no qual o ganho de massa em função do tempo ocorre devido aos poros capilares maiores. Através da regressão linear obtida para cada curva pode-se verificar a proximidade entre a função linear obtida e a

curva de absorção inicial, através do valor de R^2 (quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 mais a equação se aproxima do comportamento real da curva).

Por meio destas funções, encontramos o valor da absorvidade em função da raiz quadrada do tempo, tais valores decrescem com o aumento da quantidade de resíduo substituído. Os valores de absorvidade foram de $0,0374 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$ para a referência e de $0,0371 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$, $0,0328 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$ e $0,025 \text{ g/cm}^2\text{h}^{1/2}$ para teores de substituição de, respectivamente, 10%, 15% e 20%.

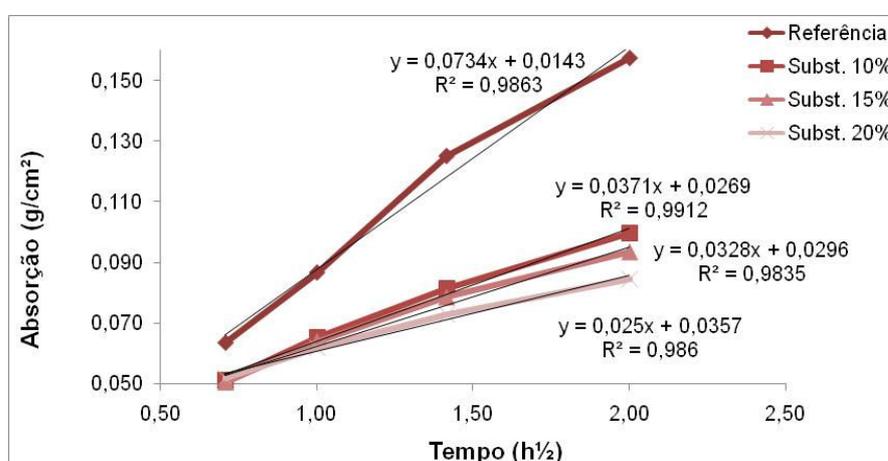


Figura 79 – Absorvidade das argamassas de cimento Portland e resíduo de vidro

Deve-se salientar ainda que Shi *et all* (2005) verificaram que a elevação de temperatura aumenta significativamente o índice de atividade pozolânica de adições minerais de vidro moído, o que pode desenvolver uma resistência similar ou maior que as argamassas produzidas com 100% de cimento, após os 7 dias de idade (a 23 °C). A elevação da temperatura é muito benéfica no aumento da resistência inicial do cimento contendo pó de vidro. Segundo os autores, isso pode ser atribuído a aparente energia de ativação das reações pozolânicas, advindas da pozolana e da cal proveniente da hidratação do cimento, gerando produtos de hidratação. Partindo deste princípio, observa-se que as argamassas utilizadas para os ensaios de absorção foram submetidos à temperatura de 60 °C para que fosse atingida a constância de massa, o que pode ter proporcionado uma aceleração da atividade pozolânica melhorando as propriedades de absorção e o índice de vazios.

5.5.4 Reação álcali-agregado

Segundo a avaliação da mitigação da reação álcali-agregado pelo método acelerado da NBR 15577-5 (ABNT, 2008), a parte 1 da norma estabelece que a comprovação da mitigação da reação deve ser obtida quando a expansão for menor que 0,10% aos 16 dias (14 dias de cura em solução alcalina). Esse valor está relacionado ao grau de reatividade do agregado (expansão), a eficiência do aglomerante e/ou adição em minimizar essa expansão e ao teor de adição utilizado.

Apenas uma mistura de referência e outra com o maior teor de 20% de substituição do cimento por RVM foram realizadas para demonstrar uma situação que seria mais desfavorável. As misturas utilizadas não atingiram os valores mínimos estabelecidos devido à alta expansibilidade do agregado de rocha basáltica que foi utilizado, entretanto, observa-se que o RVM, em teor de substituição de 20% pelo cimento de referência, não aumentou a expansão das barras de argamassa, mas também, não foi suficiente para inibi-la, a níveis aceitáveis, para os agregados altamente reativos que foram utilizados no ensaio (figura 80).

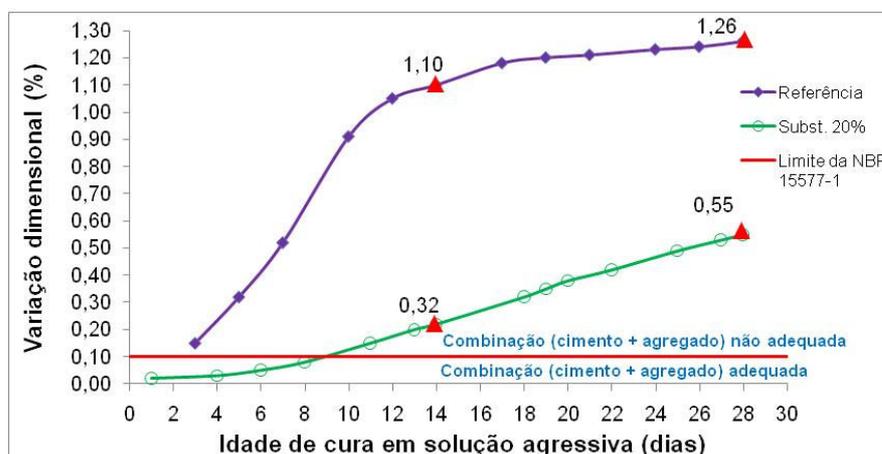


Figura 80 – Evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina

Por outro lado, verifica-se que houve uma queda da curva de reação. Essa diminuição de expansão, em relação à referência, foi de cerca de 70% aos 14 dias e de 56% aos 28 dias, o que indica que o RVM pode mitigar expressivamente, ou até mesmo eliminar, a expansão para agregados menos expansivos (ver Anexo C). Deve-se ressaltar que foi utilizado cimento

com alto teor de álcalis e não o CPI (que possui baixo teor de álcalis), visando obter um comportamento desfavorável, sem manipular a amostra.

Os ensaios de RAA realizados neste trabalho, estão de acordo com Shi *et al.* (2004) que obtiveram reduções nas expansões com a utilização de resíduo de vidro moído com finura semelhante ao do cimento Portland, os autores substituíram 20% do cimento pelo resíduo de vidro e reduziram em cerca de 60% as expansões aos 14 dias. Já nos estudos de Shi e Zheng (2007) também obtiveram resultados semelhantes trabalhando com o mesmo vidro, variaram os teores de 10% a 50% e, segundo os estudos, quanto maior o teor utilizado, menor foram as expansões obtidas. Já Shao *et al.* (2000), Comparou materiais como as cinzas volantes, fumo de sílica e resíduos de vidros moídos com diâmetros de menores que 150 μm , 75 μm e 38 μm , em substituição de 30% de cimento em barras de argamasa para RAA. Em seu estudo, Shao *et al.* (2000), verificaram que quanto mais fino o resíduo de vidro menor é a expansão causada comparado a uma argamassa de referência.

6 CONCLUSÕES

O resíduo ultrafino produzido com vidros planos foi pesquisado como substituto parcial do cimento Portland para utilização em produtos de matriz cimentícia e os resultados obtidos neste trabalho o apontam como uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental. O resíduo, após adequação da granulometria com moagem ultrafina, apresentou índice de atividade pozolânica superior ao estipulado pela norma que estabelece os critérios de classificação de pozolana no Brasil (NBR 12653, 1992).

O RVM em pastas de cimento mostrou-se como um material de potencial uso para substituição parcial do cimento Portland, no que se refere à resistência à compressão, para idades superiores a 28 dias de idade. Todavia, as resistências à compressão associada aos resultados de índice de atividade pozolânica e termoanálise das pastas sugerem que os vidros cálcicos, finamente moídos, possuem indícios de atividade pozolânica. Com os indícios de pozolanicidade, seria bem razoável adotar a idade de 56 dias como o período certo para se ter uma pasta com as características mínimas ao da referência, utilizando resíduo como substituto parcial.

As pastas com RVM apresentaram uma melhor distribuição do sistema de poros do que a pasta de referência aos 28 dias. O refinamento dos poros ocorreu com o aumento da quantidade de RVM utilizado. Houve uma diminuição de até 37,23% do volume de macroporos da pasta de referência. Como os ensaios de porosidade foram realizados aos 28 dias e a equiparação das resistências à compressão se dá efetivamente aos 56 dias, provavelmente os produtos de hidratação gerados após esta idade proporcionem uma melhoria da porosidade.

Nas argamassas (principal aplicação do resíduo), o material ofereceu resistências superiores ao traço de referência a partir dos 7 dias de idade, o que se deu inicialmente pelo efeito físico de preenchimento da matriz. Aos 28 dias de idade, os resultados continuam satisfatórios e são equivalentes aos de referência. Com 56 dias, os valores de resistência à compressão tornam a se manter superiores ao valor de referência, sobretudo para o teor de substituição de 20%. A absorção total, capilar e índice de vazios diminuíram conforme o aumento do teor de substituição, melhorando as características físicas da matriz e pode

possibilitar a redução de ataques à matriz como íons cloreto e sulfatos. Essa melhoria física incide sobre o módulo de elasticidade obtido, pois todas as argamassas com resíduo apresentaram valores superiores à referência, aos 28 dias de idade, porém o teor de 20% apresentou o maior módulo.

Uma das principais preocupações tidas durante a pesquisa foi a possibilidade da reação entre os álcalis do cimento e a sílica do vidro utilizada, o que não ocorreu segundo os ensaios realizados. Entretanto deve-se ressaltar que houve a ocorrência de queda do teor de álcalis da mistura uma vez que, a parcela de cimento responsável pela mesma foi retirada para incorporação do resíduo. Dessa maneira, existe a possibilidade de que, a diminuição da quantidade de cimento possa ter contribuído para minimizar a reação.

No geral, a utilização do RVM como adição mineral pode proporcionar melhorias na matriz, principalmente em argamassas, associando muito bem o efeito físico nas primeiras idades ao efeito pozolânico retardado em idades superiores a 28 dias. Além disso, sua utilização traz um grande benefício ambiental, uma vez que, pode-se diminuir a quantidade de cimento produzido, reduzindo a emissão de CO₂ e, também, atenuar a quantidade de resíduos despejados em locais inapropriados.

A utilização dos resíduos deve ser visto com grande otimismo, visto que apresentam grande potencial de desempenho. É importante destacar que existem vários obstáculos para realização de um coprocessamento, como a falta de incentivos e o aspecto econômico, mas podem diminuir o passivo ambiental e melhorar a qualidade de vida e o meio ambiente.

7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir da pesquisa realizada sugerem-se os seguintes tópicos para estudo:

- ✓ Utilizar outros tipos de vidro que apresentam grande volume de desperdício como os de garrafas de bebidas, lâmpadas comuns e fluorescentes (descontaminadas), além de vidros de cinescópio (descontaminados) e recipientes comuns;
- ✓ Pode-se melhorar a distribuição granulométrica do resíduo de vidro, realizando uma moagem via úmida;
- ✓ Utilizar outros aditivos minerais em conjunto para obter uma melhor resposta da matriz;
- ✓ Realizar outros ensaios de durabilidade como ataque de íons cloreto, resistência à sulfatos, permeabilidade, bem como o comportamento térmico do aditivo na matriz. Além de ensaios como o de retração autógena, retração por secagem e fluência;
- ✓ Verificar a resistência dos grãos de vidro moído e umidade interna e demanda d'água do aditivo mineral. Além de análise de lixiviação e acompanhamento das idades e hidratação com a técnica de microscopia eletrônica de varredura;
- ✓ Utilizar maiores níveis de substituição de vidros moídos na argamassa que os trabalhados até aqui e verificar suas propriedades;
- ✓ Fazer análises de reação álcali-agregado para substituições com vidro moído superiores à 20%, além de realizar, ao invés de substituições, adições com vários teores e com agregados menos reativos;
- ✓ Avaliar o comportamento do resíduo em concretos de resistência convencional e de alto desempenho.

REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. 1. ed. São Paulo: Pini, 2000. 667 p

ALVAREZ, J.; SEQUIRA, C.; COSTA, M.. Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In: 1º CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO. Lisboa, Portugal: APFAC, 2005. Disponível em: < <http://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/Paper%2051.pdf>>. Acesso em: fev. 2009.

ANDRADE, T. **Tópicos sobre durabilidade do concreto**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 753-792.

ANGULO, S. C. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. Tese, D. Sc., Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 236 p, 2005

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 469, *Test for static modulus os elasticity and poisson's ratio of concrete in compression*. U.S.A., 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 46: *Material pulverulento*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 49: *Impureza*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: *Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 76: *Cimento Portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine)*. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: *Agregados – determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: *Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5743: *Cimento Portland – determinação da perda ao fogo*. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: *Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: *Areia normal para ensaio de cimento*. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: *Cimento Portland – determinação da resistência à compressão – método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218: *Torrões de argila*. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: *Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecido – determinação da absorção de água por imersão, Índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: *Argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: *Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: *Materiais Pozolânicos – especificação*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: *Agregados – Reatividade álcali-agregado*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-4: *Agregados – Reatividade álcali-agregado*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-5: *Agregados – Reatividade álcali-agregado*. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos_pdf/BT106_2003.pdf>. Acesso em: jun. 2008.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO - ABIVIDRO. **Vidros**. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br>>. Acesso em: dez. 2007.

BARDINI, I. S. e MARCHIORO, T. B.. **Um estudo exploratório de uso de vidro reciclado como agregado de concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade do Sul de Santa Catarina. Santa Catarina, Tubarão, SC, Brasil, 2007. Disponível em: <http://www.unisul.br/content/navitacontent/_userFiles/File/pagina_dos_cursos/Engenharia_Civil_Tubarao/TCC_Ivan.pdf> Acesso em: jul. 2008

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 1998.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1994. v. 1. 445 p.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1994. v. 2. 516 p.

BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios-x em cristais**. Laboratório de raios-x: Material didático. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: 2000. Disponível em: <<http://www.fisica.ufc.br/raiosx/download/apostila.pdf>>. Acesso em: mai. 2008.

BUTTLER, A. M. **Concretos com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. Dissertação de M. Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 220 p, 2003.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CASCUDO, O. **Estrutura atômica e molecular dos materiais**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 139-178.

CARVALHO, M. R. P. **Influência das fibras de aço no desenvolvimento da reação álcali-agregado**. Dissertação de M. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 151 p, 2008.

CBIC – Câmara Brasileira da indústria da Construção Civil. Publicações 2008-2009. Votorantim vai importar cimento. Disponível em: <<http://www.cbic.org.br/mostraPagina.asp?codServico=2647&codPagina=27913>>. Acesso em: ago. 2008

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos**. Tese de D. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 485 p, 2006.

DWECK, J. PINTO, C. A.; BÜCHLER, P. M. “Study of a brazilian spent catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis”. **Journal of Thermal and Calorimetry**, v. 92, n. 1, p. 121-127, 2008.

DYER, T. D. e DHIR, R. K.. “Chemical reactions of glass cullet used as cement component”. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 6, p. 412-417, nov./dec. 2001. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JMCEE7000013000006000412000001&idtype=cvips&ident=freesearch&prog=search>>. Acesso em: ago. 2008.

DWECK, J. PINTO, C. A.; BÜCHLER, P. M. “Study of a brazilian spent catalyst as cement aggregate by thermal and mechanical analysis”. **Journal of Thermal and Calorimetry**, v. 92, n. 1, p. 121-127, 2008.

FLORÊNCIO, R. V. S. e SELMO, S. M. S. **Estudo comparativo de granulometria a laser para fins de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. In: 17^o Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, Novembro de 2006.

FONTES, C. M. A.. **Utilização de cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho**. Tese de D. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 294 p, 2008.

GONÇALVES, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial**. Tese de D.Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIN, E. M. R. “Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica”. **Revista Ambiente Construído**, v. 6, n. 4,. 83-94, out./dez. 2006.

GUARDANI, R.; ONIMARU, R. S.; CRESPO, F. C. A. **Monitoramento de processo de cristalização utilizando difração de laser e modelos de redes neurais**. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Campos do Jordão, São Pulo: EPUSP, 1999, p. 323-328.

HALL, C. “Water sorptivity of mortars and concretes: a review”. **Magazine of Concrete Research**, v. 41, n. 147, p. 51-61, Jun. 1989.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Difração**. Fundamentos de física moderna – Ótica e física moderna. v.4. 4.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., p. 91-121, 1996.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; ANDRADE, M. A. S.; SANTOS, S. B. **Deformações por Retração e Fluência**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 655-685.

ISAIA, G. C. **O concreto: da era clássica à contemporânea**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 1-43.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil, 113 p, 2000.

JOHN, Vanderley M., AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de resíduos da construção**. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da USP. In: Anais do Seminário de Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares, 2000. São Paulo, SP, Brasil, 133 p, 2000.

KARAMBERI, A; MOUTSATSOU, A.. “Participation of coloured glass cullet in cementitious materials”. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 2, p. 319-327, feb. 2005. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&imagekey=B6TWF-4CRY6F8-1-K&cdi=5561&user=686157&orig=mlkt&coverDate=02%2F28%2F2005&sk=999729997&view=c&wchp=dGLzVzz-zSkzV&md5=a3883303b5ef4b318698ac9c2e2fe04f&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em: ago. 2008.

KELHAM, S. "A water absorption test for concrete". **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 143, p. 106-110, Jun. 1998.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 295-322.

LIN, K. L.; HUANG, W. J.; SHIE, J. L.; LEE, T. C.; WANG, K. S.; LEE, C. H.. "The utilization of thin film transistor liquid crystal display waste glass as a pozzolanic material". **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, n. 2-3, p. 916-921, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6TGF-4T0WK0G-2-R&_cdi=5253&_user=686157&_orig=search&_coverDate=04%2F30%2F2009&_sk=998369997&_view=c&_wchp=dGLbVIW-zSkWz&_md5=22ac375f778a89dd6fa05e54350082e4&_ie=/sdarticle.pdf> . Acesso em: fev. 2009.

LIBÓRIO, J. B. L.; CASTRO, A. L.; SILVA, F. G.; SILVA, V. M. **Concreto de alto desempenho com sílica ativa da casca de arroz**. INCOS 05 – International Conference on Concrete for Structures. Coimbra, 2005.

LIDIANE, M. L. *et al.* **Comportamento de argamassas com adição de diferentes granulometrias de fibras de borracha de pneus**. In: Seminário - Concreto: durabilidade, qualidade e novas tecnologias, 2004, Ilha Solteira. Anais eletrônicos. São Paulo: UNESP, 9 p, 2004.

LÓPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. "Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino". **Revista Cerâmica**, n. 51, 2005, p. 318-324.

MAIA, S. B. O vidro e sua fabricação. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 211 p.

MARTYS, N. S.; FERRARIS C. F. "Sorptions of water in mortars and concrete". **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 143, p. 106-110, Jun. 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Pulo: IBRACON, 2008. 580 p.

Microscópio eletrônico de varredura com EDS e Sistema de nanolitografia. Instituto de Física. Departamento de física aplicada. Laboratório de filmes finos. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://fap01.if.usp.br/~lff/mev.html>>. Acesso em: abr. 2008.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto Estrutural**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 345-379.

MOLIN, D. C. C. D. **Técnicas experimentais para estudo da microestrutura**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 403-436.

NASCIMENTO FILHO, V. F. **Fluorescência de raios x por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total**. Laboratório de instrumentação nuclear - CENA: Material didático. Universidade de São Paulo. São Paulo: 1999. Disponível em: <http://web.cena.usp.br/apostilas/Virgilio/cen-5723/EDXRF_TXRF.doc>. Acesso em: mai. 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Eng. Salvador Eugênio Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

ORTIS, M. J.; CAMPOS, B.; PICÓ, M.; GOZALBO, A. **Métodos de análisis granulométrico. Aplicación al control de la granulometría de materias primas (I)**. Técnica Cerâmica, n.210, p. 19-23, 1993.

PAULON, V.A. **A microestrutura do concreto convencional**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 583-604.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 11. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1998. 435 p.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1995. 307. p.

POLLEY, C.; CRAMER, S. M.; CRUZ, R. V. "Potential for using waste glass in portland cement concrete". **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 10, n. 4, p. 210-219, nov. 2001. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JMCEE7000010000004000210000001&idtype=cvips&ident=freesearch&prog=searh>>. Acesso em: ago. 2008.

PRADO, M. R. **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e pet utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. Tese de D. Sc., Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, Brasil, 188 p, 2007.

ROSA, S. E. S.; COSENSA, J. P.; BARROSO, D. V. **Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil**. BNDS Setorial, Rio de Janeiro, n. 26, 2007, p. 101-138.

SABIR, B. B.; WILD, S.; O'FARRELL, M. "A water sorptivity test for a mortar and concrete". **Materials and structures**, v. 31, p. 568-574, Oct. 1998.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. "Studies on concrete containing ground waste glass". **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 1, p. 91-100, jan. 2000. Disponível em: < <http://research.guilan.ac.ir/research/doc/c1666.pdf> > Acesso em: ago. 2008.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H. "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders". **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 987-993, may 2005. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIImg&_imagekey=B6TWG-4CMYBG6-2-1&_cdi=5562&_user=686157&_orig=search&_coverDate=05%2F31%2F2005&_sk=999649994&view=c&wchp=dGLzVlz-zSkzS&md5=eb73fe4e992ad6208ad15750283403a9&ie=/sdarticle.pdf > Acesso em: ago. 2008.

SHI, C.; ZHENG, K. "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete". **Cement and Concrete Research**, v. 52, n. 2, p. 234-247, dec. 2007. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIImg&_imagekey=B6VDX-4NNPH7C-1-1&_cdi=5994&_user=686157&_orig=search&_coverDate=12%2F31%2F2007&_sk=999479997&view=c&wchp=dGLzVlz-zSkzV&md5=90a4741ae4de0ed940b1c5641583bffb&ie=/sdarticle.pdf > Acesso em: ago. 2008.

SILVA, M. G. **Cimentos Portland com adições minerais**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 761-793.

SICHERI, E. P.; CARAM, R.; SANTOS, J. C. P. **Vidros na construção civil**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 654-691.

TASHIMA, M. M. **Cinza da casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matriz de cimento Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 81 p, 2006.

TOPÇU, I. B.; CANBAZ, M. "Properties of concrete containing waste glass". **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 267-274, feb. 2004. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIImg&_imagekey=B6TWG-49G48RF-3-N&_cdi=5562&_user=686157&_orig=search&_coverDate=02%2F29%2F2004&_sk=999659997&view=c&wchp=dGLbVzz-zSkWz&md5=a58aba8ac2babe5e20e54df1c2424e08&ie=/sdarticle.pdf > Acesso em: ago. 2008.

TOLEDO FILHO, R.D., GONÇALVES, J.P., AMERICANO, B.B., FAIRBAIRN, E.M.R. "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil", **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 9, pp. 1357-1365, 2007.

YONG, J. F.; MINDESS, S.; GRAY, R. J.; BENTUR, A. **The science and technology of engineering materials**. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 384 p.

APÊNDICE

APÊNDICE A – CURVAS TG/DTG DAS PASTAS DE CIMENTO PORTLAND
CONTENDO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO

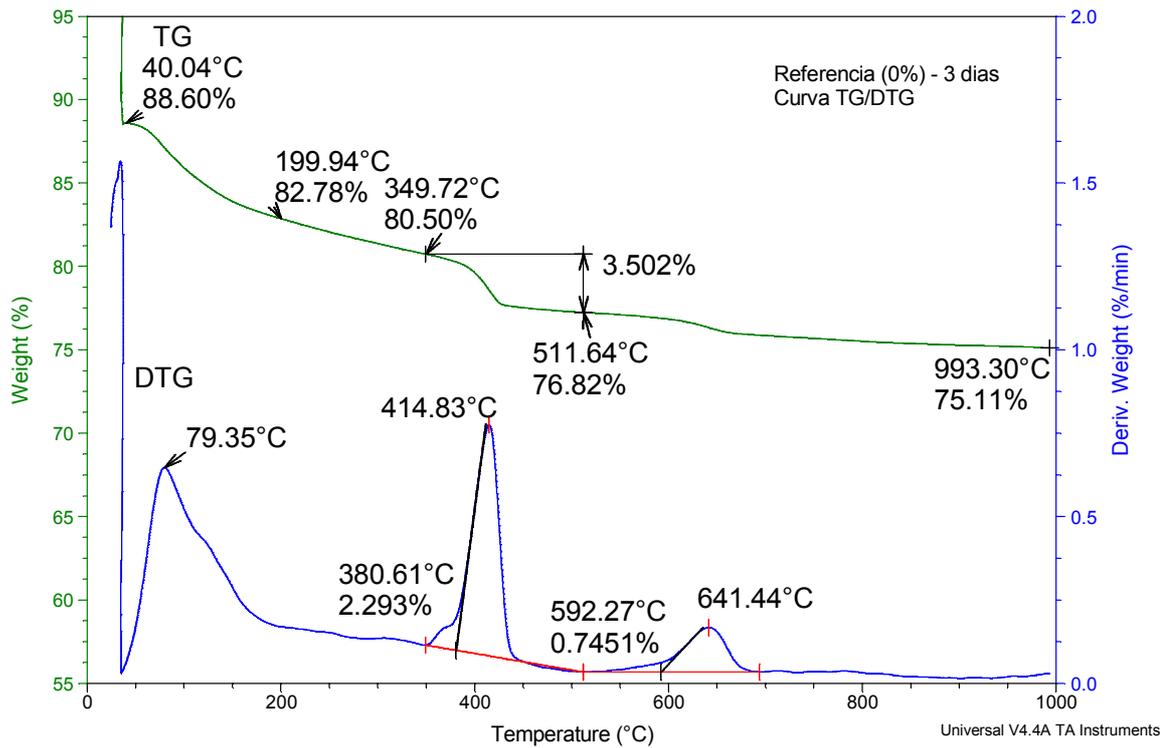


Figura A.01 – Termoanálise da pasta de cimento Portland de referência aos 3 dias de idade.

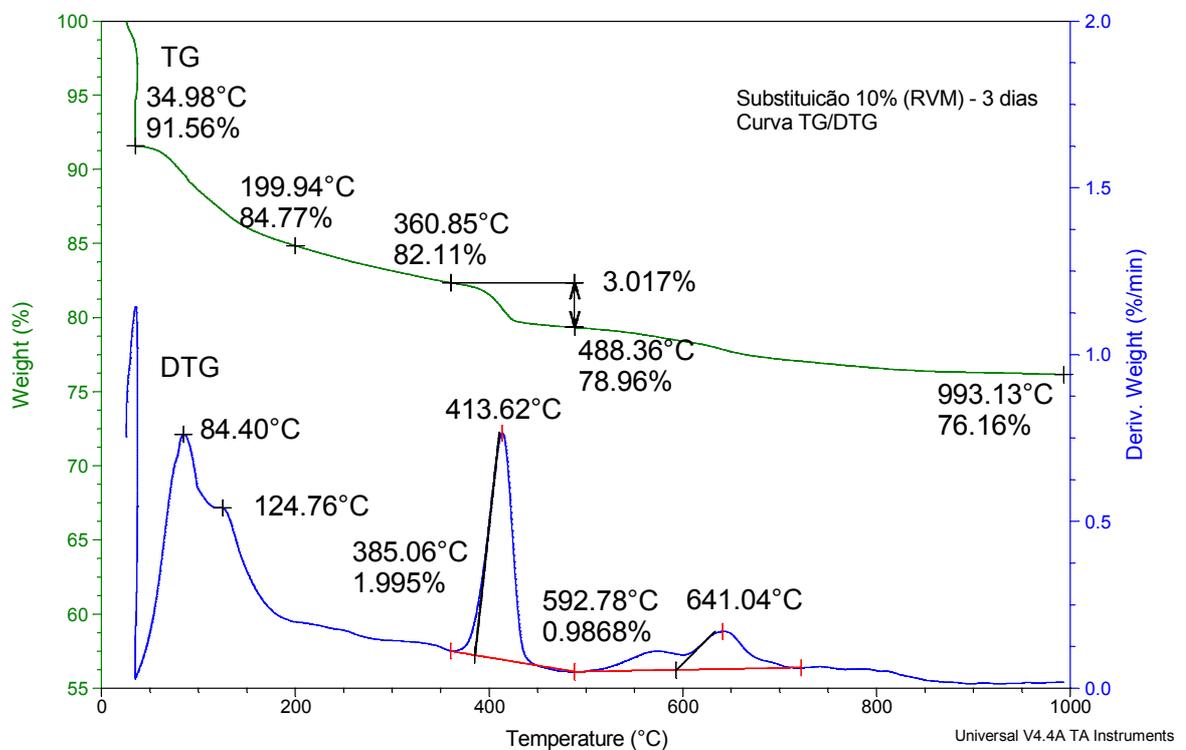


Figura A.02 – Termoanálise da pasta com substituição de 10% de cimento Portland aos 3 dias de idade.

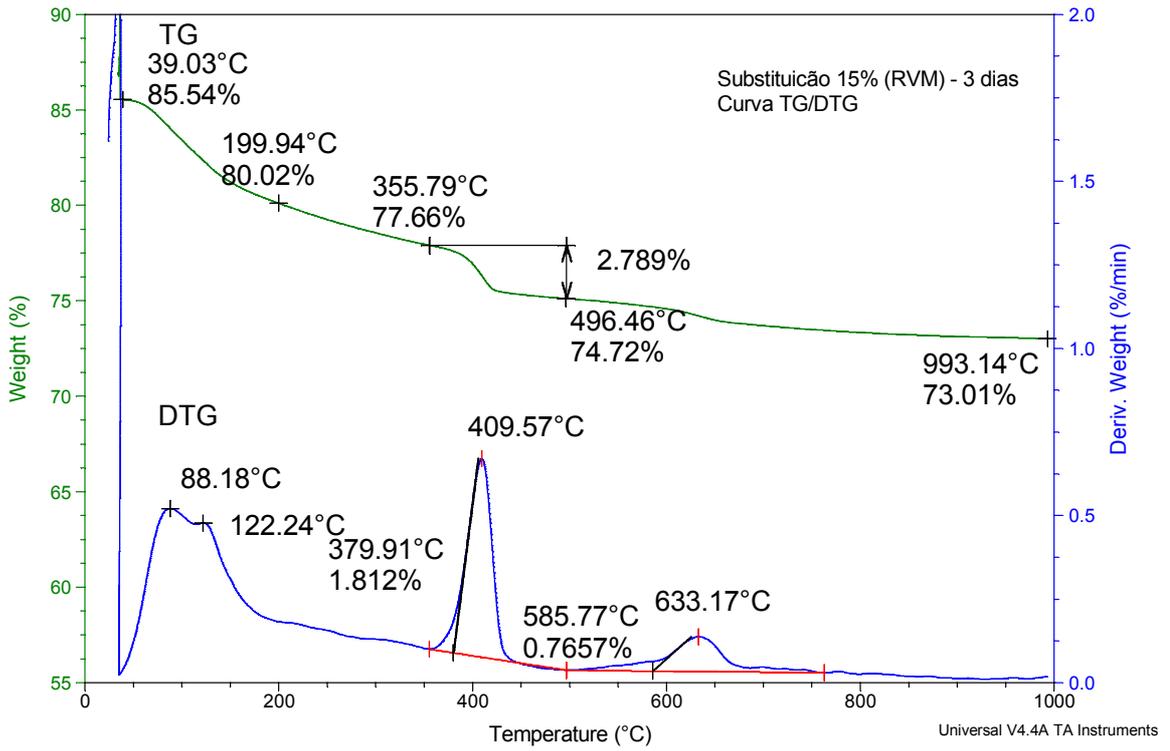


Figura A.03 – Termoanálise da pasta com substituição de 15% de cimento Portland aos 3 dias de idade.

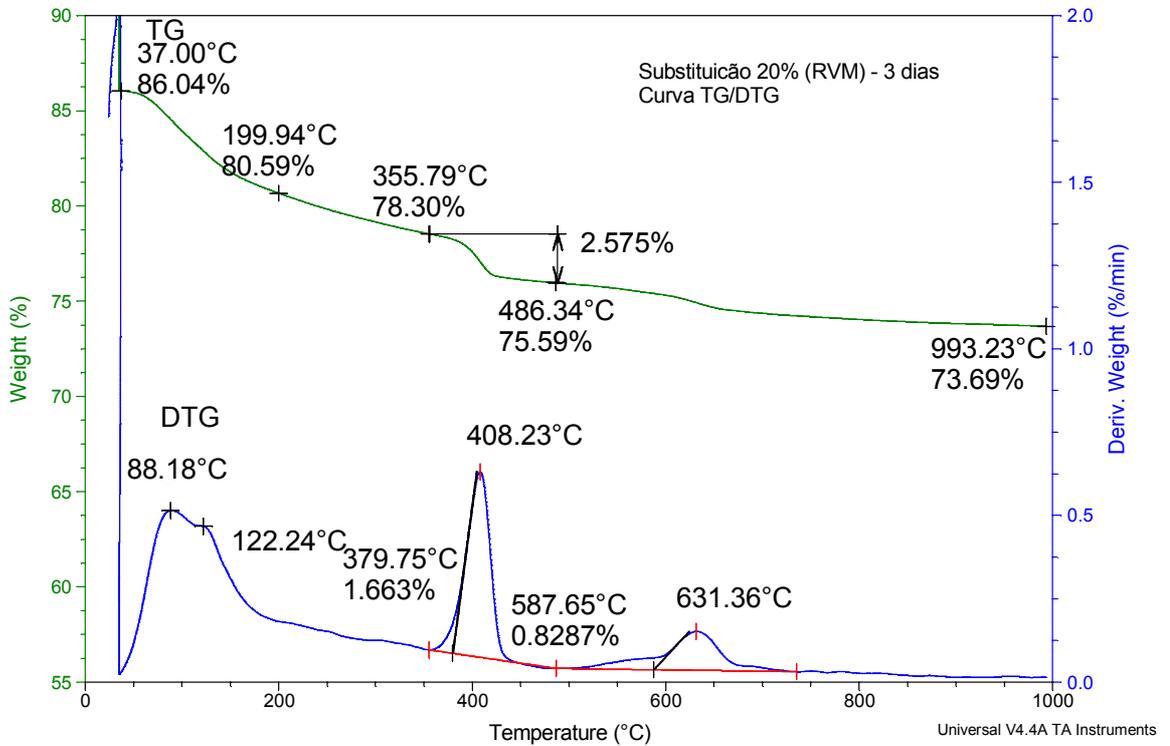


Figura A.04 – Termoanálise da pasta com substituição de 20% de cimento Portland aos 3 dias de idade.

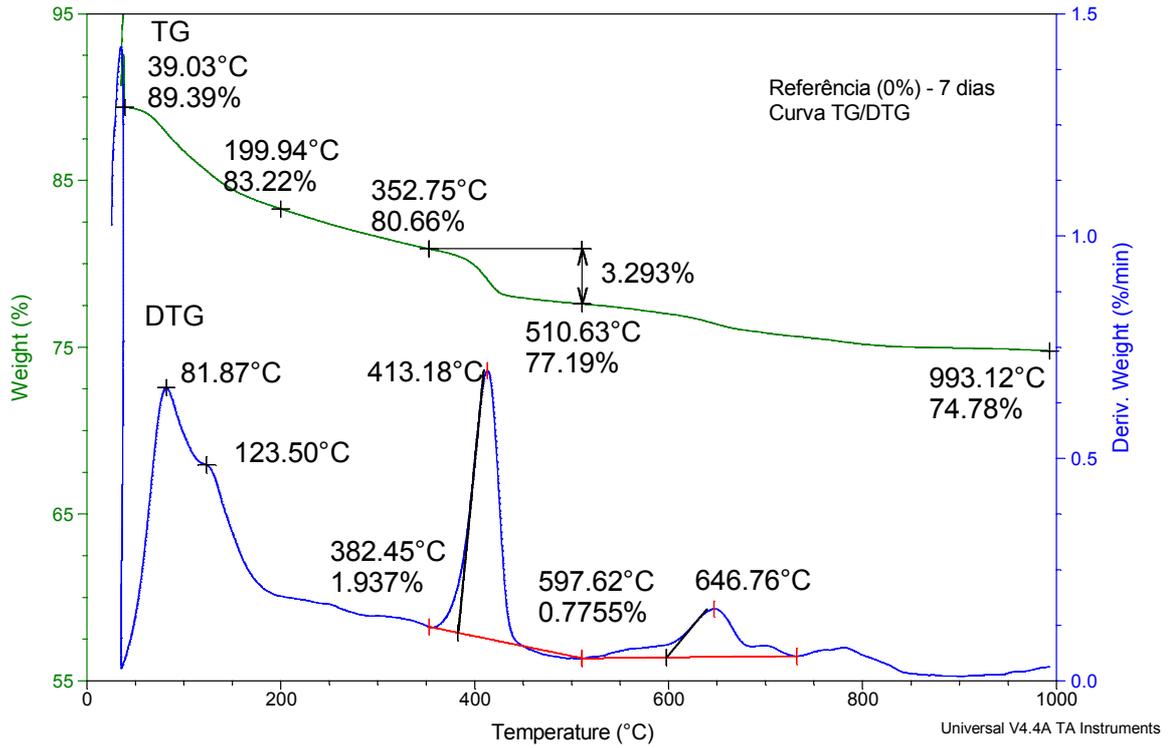


Figura A.05 – Termoanálise da pasta de cimento Portland de referência aos 7 dias de idade.

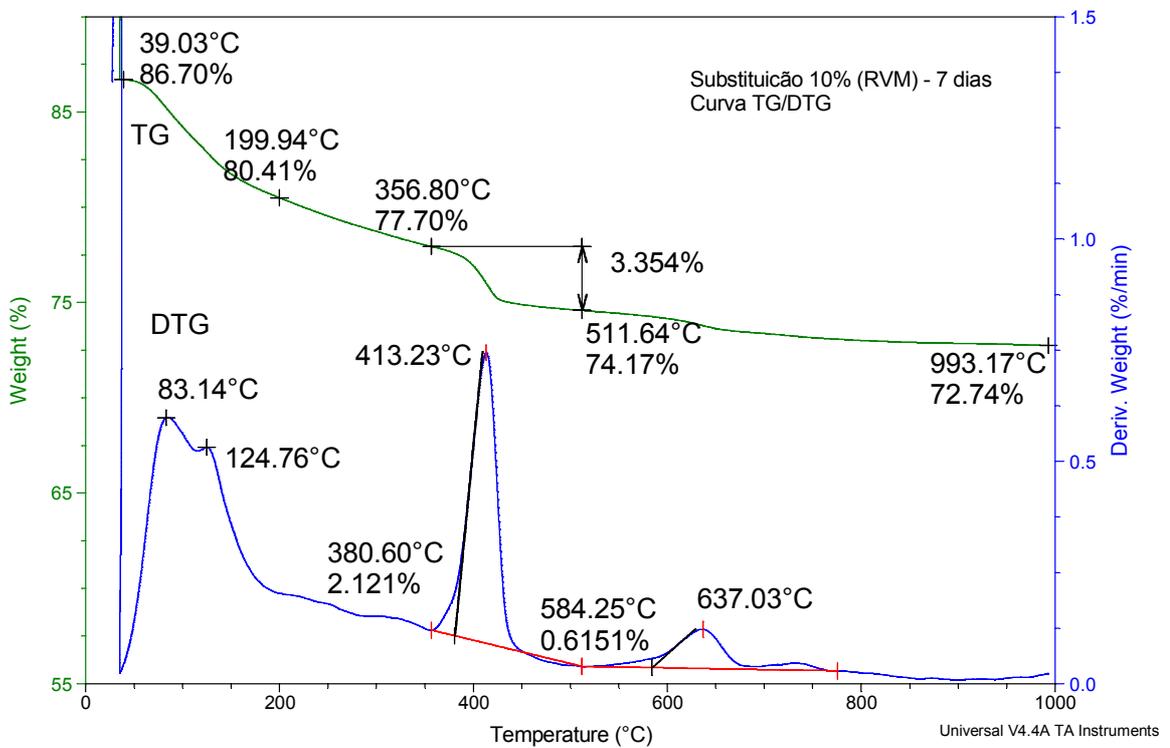


Figura A.06 – Termoanálise da pasta com substituição de 10% de cimento Portland aos 7 dias de idade.

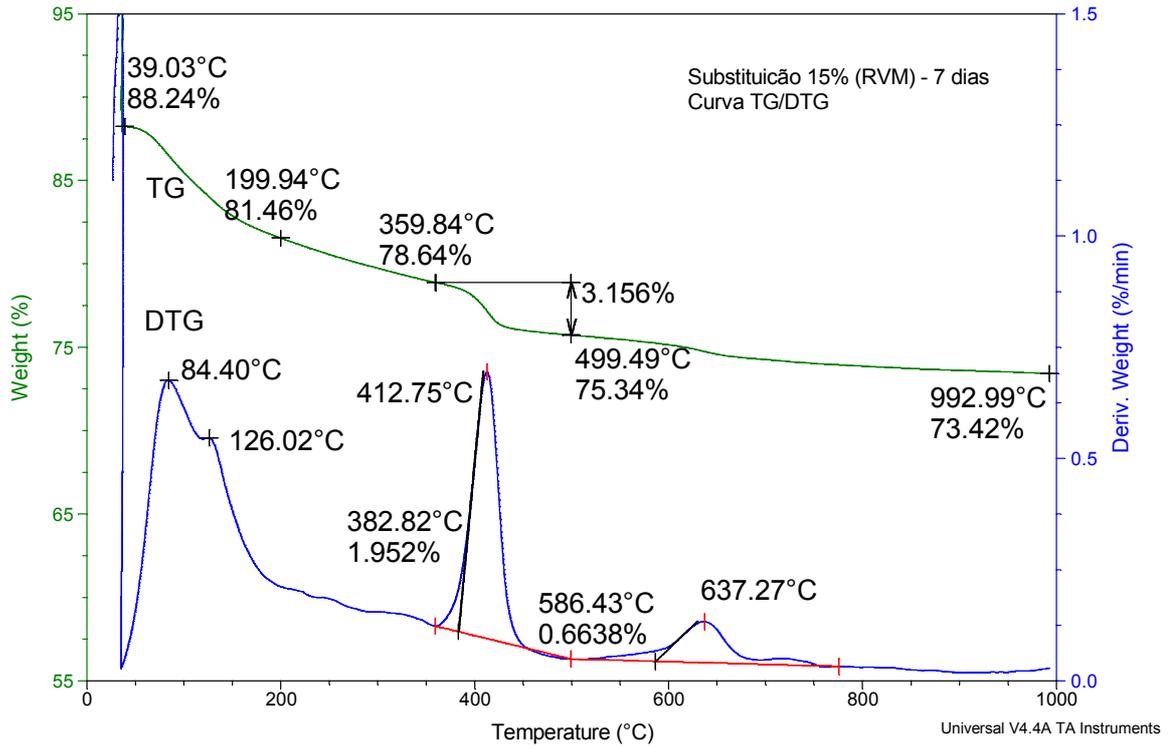


Figura A.07 – Termoanálise da pasta com substituição de 15% de cimento Portland aos 7 dias de idade.

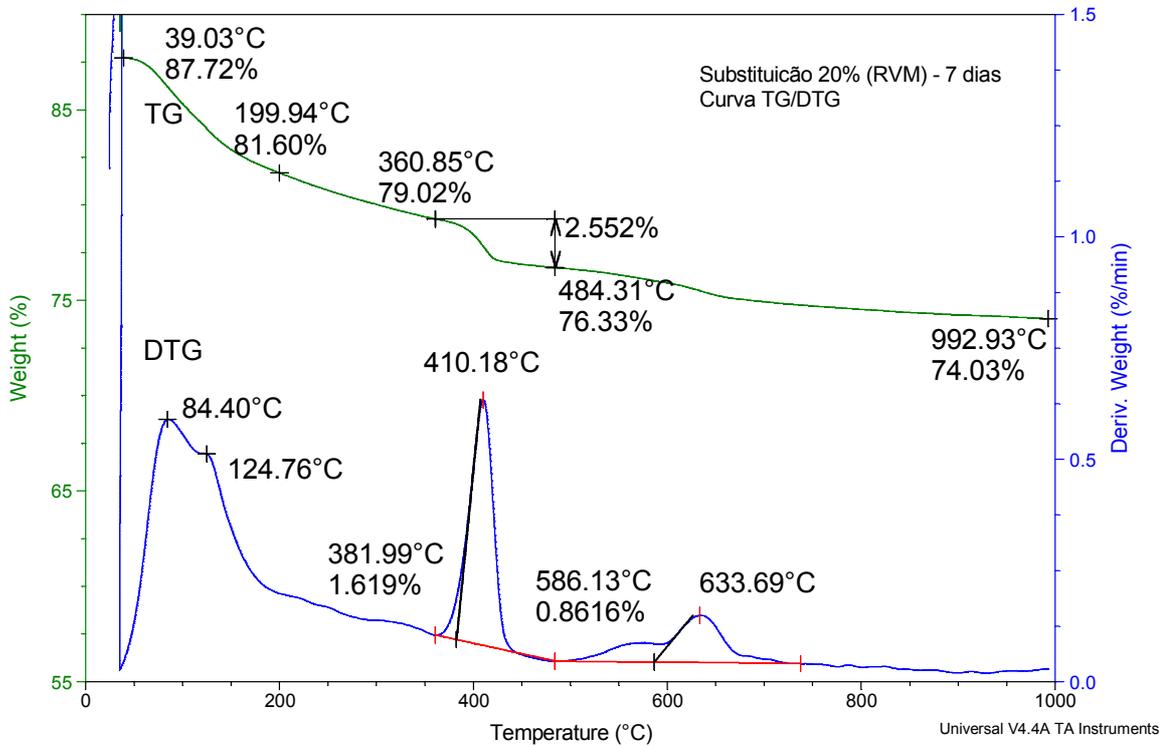


Figura A.08 – Termoanálise da pasta com substituição de 20% de cimento Portland aos 7 dias de idade.

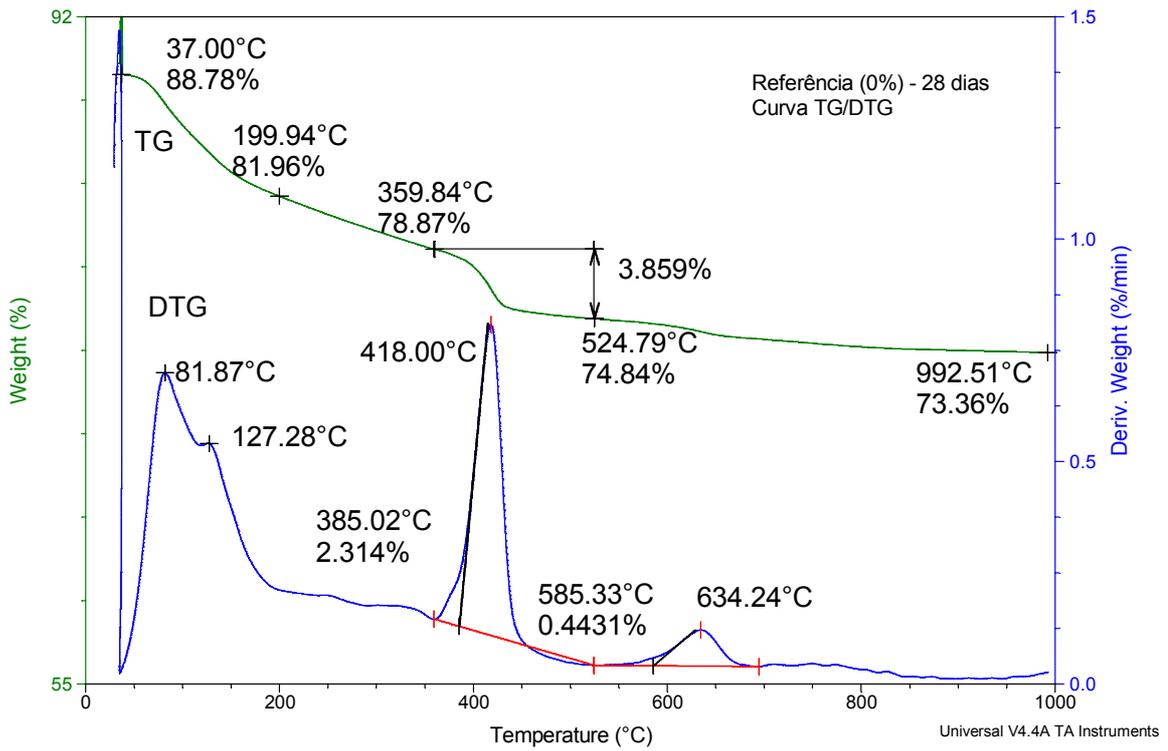


Figura A.09 – Termoanálise da pasta de cimento Portland de referência aos 28 dias de idade.

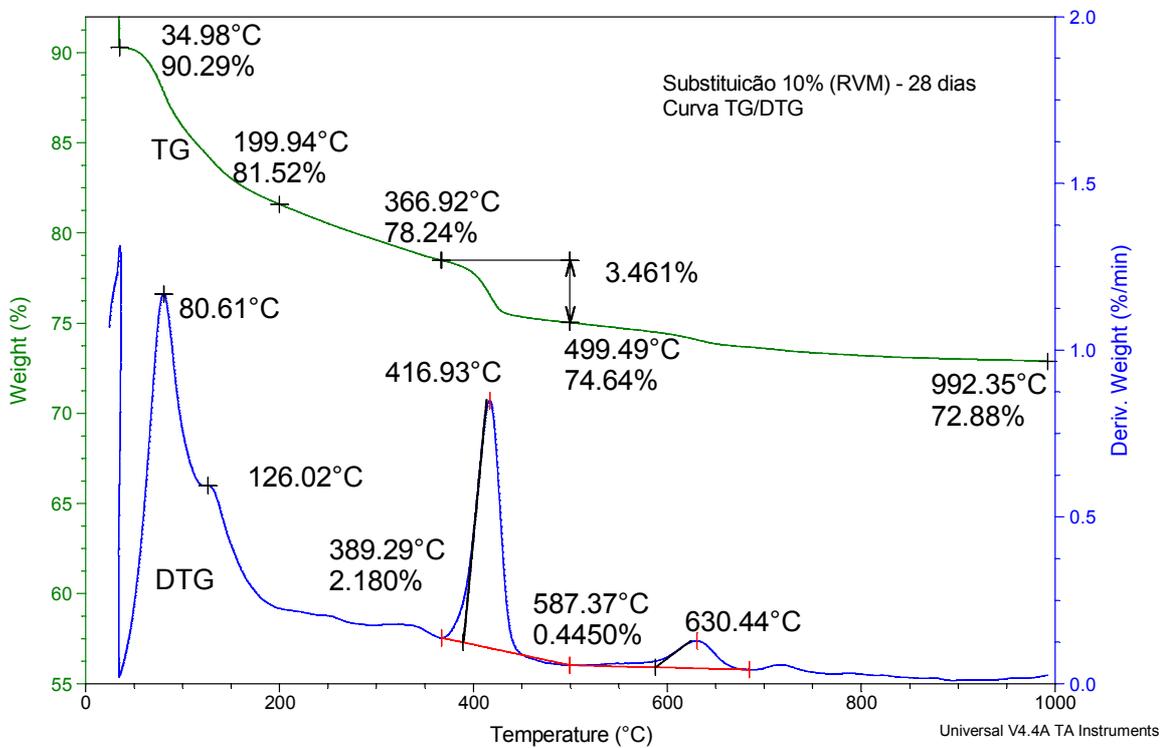


Figura A.10 – Termoanálise da pasta com substituição de 10% de cimento Portland aos 28 dias de idade.

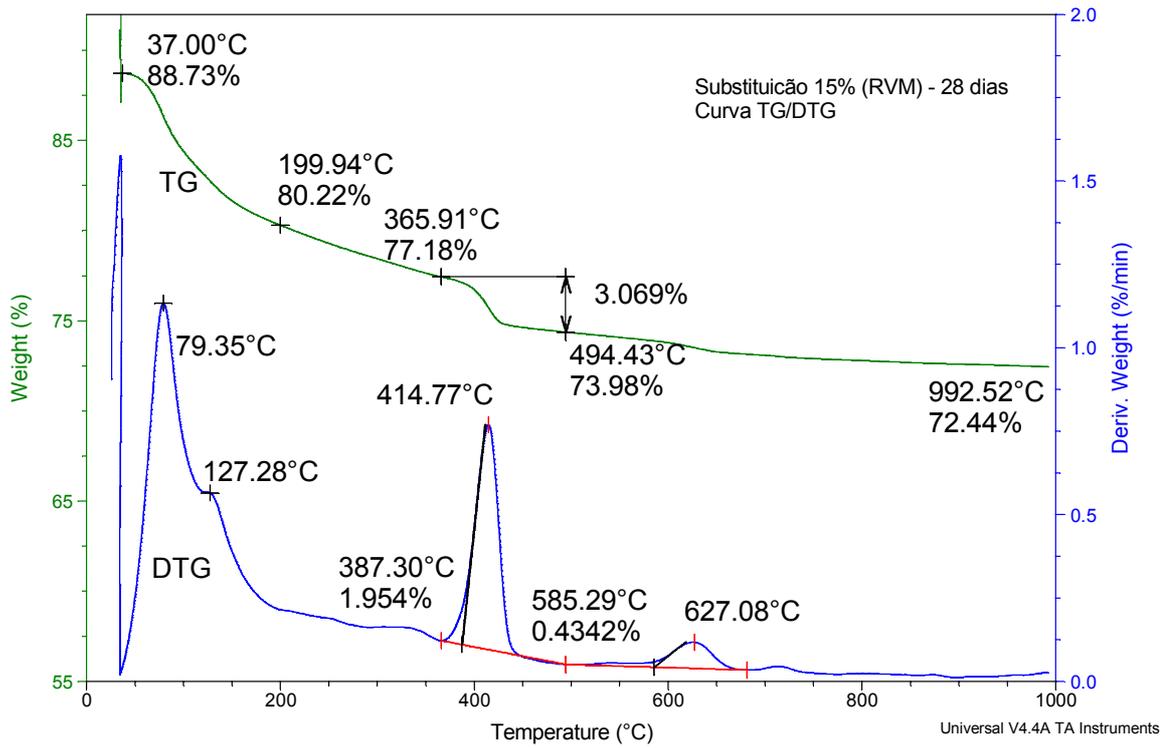


Figura A.11 – Termoanálise da pasta com substituição de 15% de cimento Portland aos 28 dias de idade.

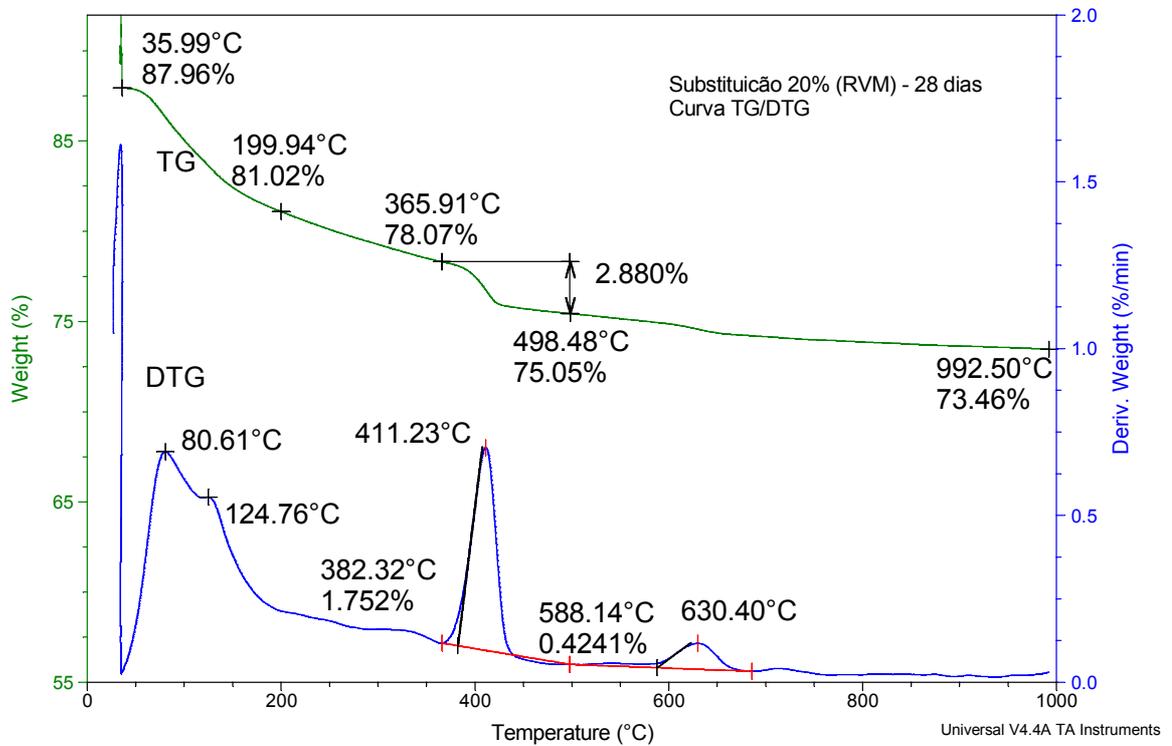


Figura A.12 – Termoanálise da pasta com substituição de 20% de cimento Portland aos 28 dias de idade.

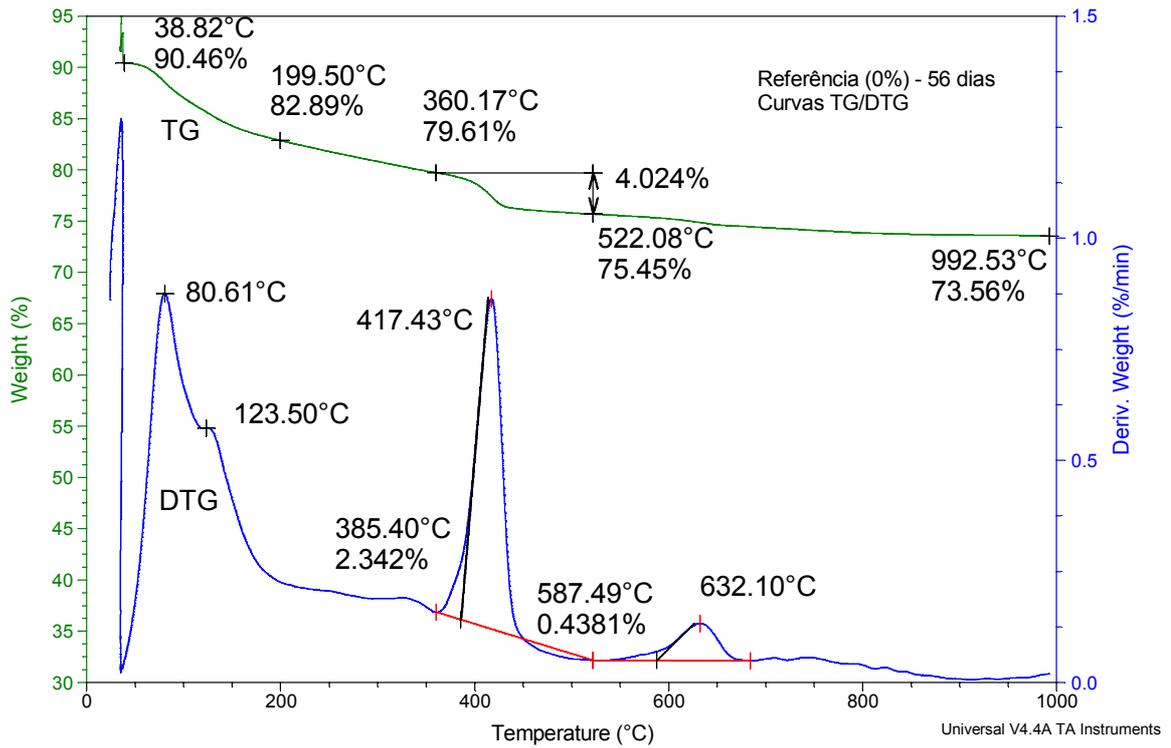


Figura A.13 – Termoanálise da pasta de cimento Portland de referência aos 56 dias de idade.

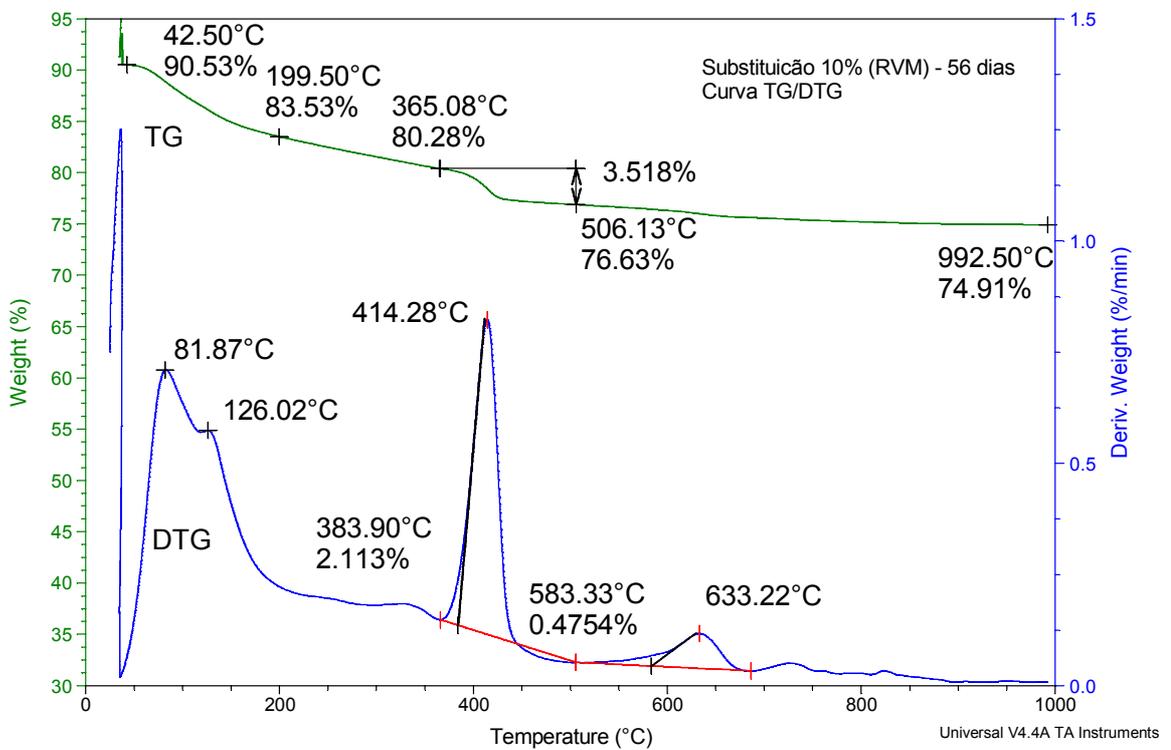


Figura A.14 – Termoanálise da pasta com substituição de 10% de cimento Portland aos 56 dias de idade.

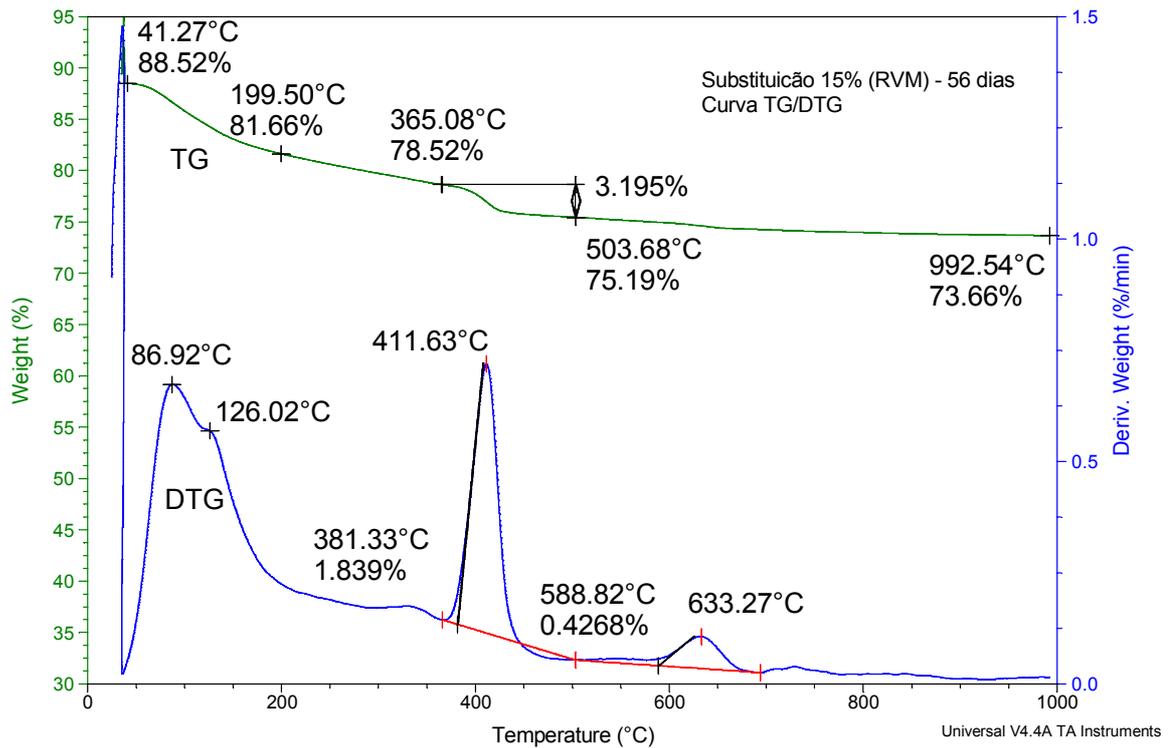


Figura A.15 – Termoanálise da pasta com substituição de 15% de cimento Portland aos 56 dias de idade.

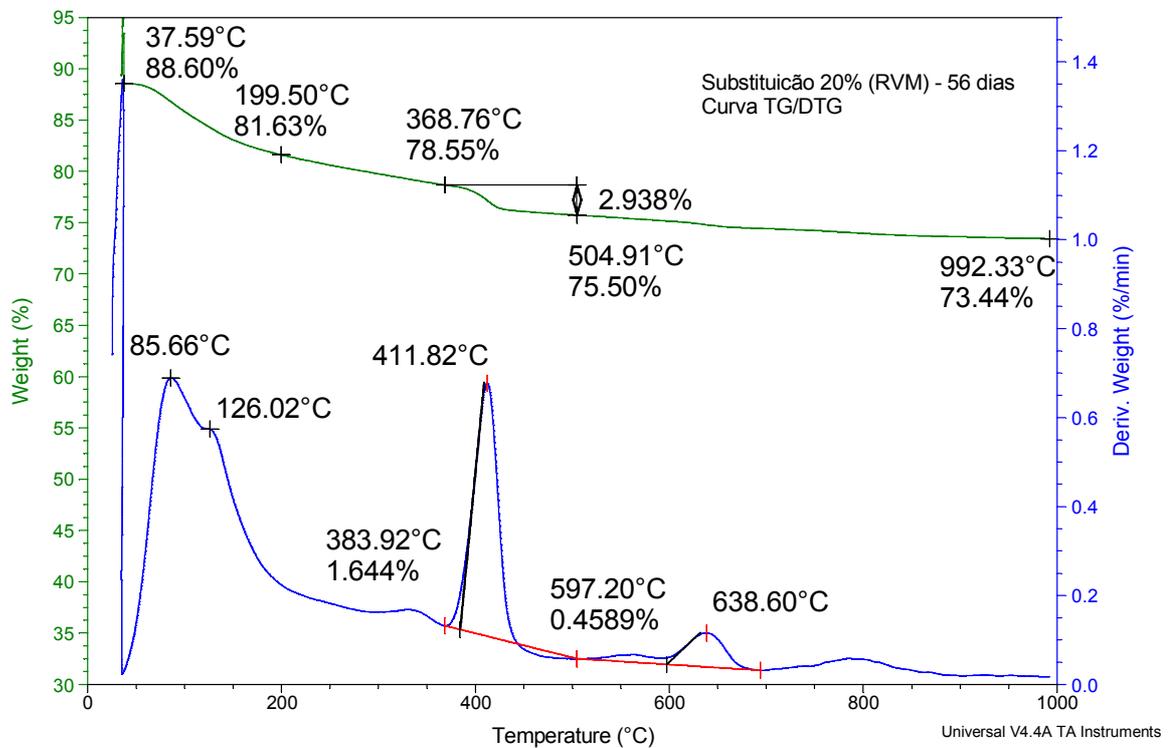


Figura A.16 – Termoanálise da pasta com substituição de 20% de cimento Portland aos 56 dias de idade.

APÊNDICE B – TABELAS DE DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA
QUIMICAMENTE COMBINADA COM O HIDRÓXIDO DE CÁLCIO

Tabela B.01 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 10% do cimento Portland - 3 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01

Pasta	Oxidos do Cimento como substituição (%)	Oxidos do Resíduo Adicionado (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo - 10%	10	9,20	90,48
		0,00	100,00

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial					
		AlferT ₀ -teir (% de amostra a 200oC)	Beboe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)	Perda CO ₂ (área da curva do CC)	Alfer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alfer CC (% de amostra no fim da curva do CC)
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	1,395	99,07	97,67
Pasta de Referência - 3 dias	88,60	82,78	80,52	2,293	0,7451	78,23	77,48
Pasta com resíduo - 10%	91,56	84,77	82,11	1,995	0,9868	76,16	80,12

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.				
		AlferT ₀ -teir (% de amostra a 200oC)	Beboe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alfer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alfer CC (% de amostra no fim da curva do CC)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46	100,00
Pasta de Referência - 3 dias	117,96	110,21	107,20	104,15	103,16	100,00
Pasta com resíduo - 10%	120,22	111,31	107,81	105,19	103,90	100,00

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de cimento.				
		AlferT ₀ -teir (% de amostra a 200oC)	Beboe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alfer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alfer CC (% de amostra no fim da curva do CC)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46	100,00
Pasta de Referência - 3 dias	117,96	110,21	107,20	104,15	103,16	100,00
Pasta com resíduo - 10%	132,86	123,01	119,15	116,25	114,82	100,00

Amostra	Água livre	Cálculo percentual em relação as respectivas massas bases calcinadas de cimento.			
		Total de água combinada	Água combinada com (T ₀ b-Ep)H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28	3,26
Pasta de Referência - 3 dias	27,33	13,81	7,75	12,55	2,25
Pasta com resíduo - 10%	24,54	16,61	9,85	11,90	3,25

Note: Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14
Relação a/c 40

Amostra	Água livre	Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.			
		Total de água combinada	Água combinada com (T ₀ b-Ep)H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25	3,17
Pasta de Referência - 3 dias	26,57	13,43	7,53	12,20	2,19
Pasta com resíduo - 10%	23,85	16,15	9,58	11,57	3,16

Amostra	Água livre	Valores da reação de hidratação			
		Total de água combinada	Água combinada com (T ₀ b-Ep)H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 3 dias	27,51	12,49	7,14	10,96	-0,98
Pasta com resíduo - 10%	24,79	15,21	9,19	10,32	-0,01

Tabela B.02 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 10% do cimento Portland - 7 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01

Pasta	Oxidos do Cimento com a substituição (%)	Oxidos do Resíduo Adicionado (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	10	87,50	90,48
		97,22	100,00

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial			
		AferToB-ete (% de amostra a 200oC)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)	Perda CO ₂ (área da curva do CC)	Afer CC (% de amostra no fim da curva do CC)
Cimento	100,00	99,37	0,3037	1,395	97,22
Pasta de Referência - 7 dias	89,39	83,22	80,66	0,7755	74,78
Pasta com resíduo - 10%	86,70	80,41	77,70	0,6151	72,74

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calculada de resíduo.			
		AferToB-ete (% de amostra a 200oC)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)	Afer CC (% de amostra no fim da curva do CC)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	101,90	100,46	100,00
Pasta de Referência - 7 dias	119,54	111,29	107,86	104,24	100,00
Pasta com resíduo - 10%	119,19	110,54	106,82	103,90	100,00

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base e calcimada de cimento.			
		AferToB-ete (% de amostra a 200oC)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)	Afer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Afer CC (% de amostra no fim da curva do CC)
Cimento	102,86	102,21	101,90	100,46	100,00
Pasta de Referência - 7 dias	119,54	111,29	107,86	104,24	100,00
Pasta com resíduo - 10%	131,73	122,17	118,05	114,83	113,89

Amostra	Água livre	Cálculo percentual em relação às respectivas massas bases calculadas de cimento.		
		Água combinada com (ToB+Ep)H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28
Pasta de Referência - 7 dias	26,88	14,26	8,25	10,65
Pasta com resíduo - 10%	24,25	16,90	9,36	13,25

Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14
Relação a/c 40

Amostra	Água livre	Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.		
		Água combinada com (ToB+Ep)H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25
Pasta de Referência - 7 dias	26,13	13,87	8,02	10,35
Pasta com resíduo - 10%	23,57	16,43	9,29	12,88

Amostra	Água livre	Valores da reação de hidratação		
		Água combinada com (ToB+Ep)H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
Cimento	0	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 7 dias	27,07	12,93	7,63	9,11
Pasta com resíduo - 10%	24,51	15,49	8,90	11,63

Tabela B.03 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 10% do cimento Portland - 28 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01

Pasta	Óxidos do Cimento com a substituição (%)	Óxidos do Resíduo Adicionado (%)	Óxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	10	9,20	90,48
		0,00	100,00

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial			
		AferToB-ete (% de amostra a 200oC)	Beboe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H2O (área da curva do CH)	Perda CO2 (área da curva do CC)
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	1,395
Pasta de Referência - 28 dias	88,78	81,96	78,87	2,314	0,4431
Pasta com resíduo - 10%	90,29	81,52	78,24	2,18	0,445

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.			
		AferToB-ete (% de amostra a 200oC)	Beboe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Afer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46
Pasta de Referência - 28 dias	121,02	111,72	107,51	104,36	103,75
Pasta com resíduo - 10%	123,89	111,86	107,35	104,36	103,75

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base e calcinada de cimento.			
		AferToB-ete (% de amostra a 200oC)	Beboe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Afer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46
Pasta de Referência - 28 dias	121,02	111,72	107,51	104,36	103,75
Pasta com resíduo - 10%	136,92	123,62	118,64	115,34	114,66

Amostra	Água livre	Cálculo percentual em relação às respectivas massas bases calcinadas de cimento.		
		Água combinada com (ToB+Ep)/H2O	Água combinada com Ca(OH)2	Água combinada com CaCO3
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28
Pasta de Referência - 28 dias	24,48	16,66	9,30	12,97
Pasta com resíduo - 10%	19,57	21,58	13,30	13,59

Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14
Relação a/c 40

Amostra	Água livre	Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.		
		Água combinada com (ToB+Ep)/H2O	Água combinada com Ca(OH)2	Água combinada com CaCO3
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25
Pasta de Referência - 28 dias	23,80	16,20	9,04	12,61
Pasta com resíduo - 10%	19,02	20,98	12,93	13,21

Amostra	Água livre	Valores da reação de hidratação		
		Água combinada com (ToB+Ep)/H2O	Água combinada com Ca(OH)2	Água combinada com CaCO3
Cimento	0	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 28 dias	24,73	15,27	8,65	11,36
Pasta com resíduo - 10%	19,96	20,04	12,54	11,97

Tabela B.04 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 10% do cimento Portland - 56 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01

Pasta	Óxidos do Cimento com a substituição (%)	Óxidos do Resíduo Adicionado (%)	Óxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	10	9,20	90,48
		0,00	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial									
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AferToB-eire (% de amostra a 200oC)	Bebefe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H2O (área da curva do CH)	Perda CO2 (área da curva do CC)	Resíduo at 1000°C (amostra no fim do ensaio)	Afer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Afer CC (% de amostra no fim da curva do CC)	
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	1,395	97,22	99,07		97,67
Pasta de Referência - 56 dias	90,46	82,89	79,61	2,342	0,4381	73,56	77,27		76,83
Pasta com resíduo - 10%	90,53	83,53	80,28	2,113	0,4754	74,91	78,17		77,69

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.									
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AferToB-eire (% de amostra a 200oC)	Bebefe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Afer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Afer CC (% de amostra no fim da curva do CC)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)			
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46	100,00			
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	104,45	100,00			
Pasta com resíduo - 10%	120,85	111,51	107,17	104,35	103,71	100,00			

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base e calcinada de cimento.									
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AferToB-eire (% de amostra a 200oC)	Bebefe CH (% de amostra no início da curva do CH)	Afer CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Afer CC (% de amostra no fim da curva do CC)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)			
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46	100,00			
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	104,45	100,00			
Pasta com resíduo - 10%	133,56	123,23	118,44	115,52	114,62	100,00			

Cálculo percentual em relação as respectivas massas bases calcinadas de cimento.									
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com		Água combinada com		
			Tob+Ep/H2O	Ca(OH)2	Ca(OH)2	CaCO3	CaCO3		
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28	3,26				
Pasta de Referência - 56 dias	23,21	17,93	10,29	13,09	1,35				
Pasta com resíduo - 10%	22,90	18,24	10,33	12,82	1,59				

Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14
Relação a/c 40

Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.									
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com		Água combinada com		
			Tob+Ep/H2O	Ca(OH)2	Ca(OH)2	CaCO3	CaCO3		
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25	3,17				
Pasta de Referência - 56 dias	22,56	17,44	10,00	12,73	1,32				
Pasta com resíduo - 10%	22,27	17,73	10,04	12,46	1,55				

Valores da reação de hidratação									
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com		Água combinada com		
			Tob+Ep/H2O	Ca(OH)2	Ca(OH)2	CaCO3	CaCO3		
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00				
Pasta de Referência - 56 dias	23,50	16,50	9,61	11,48	-1,85				
Pasta com resíduo - 10%	23,20	16,80	9,65	11,21	-1,62				

Tabela B.05 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 15% do cimento Portland - 3 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01
F		
Pasta	Oxidos do Cimento com a substituição (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	15	85,69
	97,22	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Alter tobr-eitr (% de amostra a 200oC)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)		Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda CO ₂ (área da curva do CC)	
Cimento	100,00	99,61	99,37	1,395	99,07
Pasta de Referência - 3 dias	88,60	82,78	80,52	0,7451	78,23
Pasta com resíduo - 15%	85,54	80,02	77,66	1,812	75,85
A			B	C	D
E					
F					
					Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
					97,22
					75,11
					73,01
					77,48
					75,08

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Alter tobr-eitr (% de amostra a 200oC)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)		Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda CO ₂ (área da curva do CC)	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46
Pasta de Referência - 3 dias	117,96	110,21	107,20	104,15	103,16
Pasta com resíduo - 15%	117,16	109,60	106,37	103,89	102,84

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de cimento.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	Alter tobr-eitr (% de amostra a 200oC)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)		Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda CO ₂ (área da curva do CC)	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,46
Pasta de Referência - 3 dias	117,96	110,21	107,20	104,15	103,16
Pasta com resíduo - 15%	136,73	127,91	124,13	121,24	120,01

Cálculo percentual em relação as respectivas massas bases calcinadas de cimento.					
Amostra	Água livre	Água combinada com		Água combinada com	
		(Tob+Etr)H ₂ O	C ₄ (OH) ₂	C ₄ (OH) ₂	CaCO ₃
Cimento	0,00	0,40	1,28	3,26	3,26
Pasta de Referência - 3 dias	27,33	13,81	7,75	12,55	2,25
Pasta com resíduo - 15%	25,65	15,49	8,82	11,91	2,78
Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14					
Relatório a/c					
40					

Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.					
Amostra	Água livre	Água combinada com		Água combinada com	
		(Tob+Etr)H ₂ O	C ₄ (OH) ₂	C ₄ (OH) ₂	CaCO ₃
Cimento	0,00	0,39	1,25	3,17	3,17
Pasta de Referência - 3 dias	26,57	13,43	7,53	12,20	2,19
Pasta com resíduo - 15%	24,94	15,06	8,38	11,38	2,70

Valores da reação de hidratação					
Amostra	Água livre	Água combinada com		Água combinada com	
		(Tob+Etr)H ₂ O	C ₄ (OH) ₂	C ₄ (OH) ₂	CaCO ₃
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 3 dias	27,51	12,49	7,14	10,96	-0,98
Pasta com resíduo - 15%	25,87	14,13	8,19	10,33	-0,47

Tabela B.07 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 15% do cimento Portland - 28 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo		
	97,22	92,01		
F				
Pasta	% subst	Oxidos de Cimento com a substituição (%)	Oxidos do Resíduo Adicionado (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	1,5	82,64	13,80	85,69
		97,22	0,00	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial									
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterT _{ob+etr} (% de amostra a 200oC)	Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Pêda H ₂ O (área da curva do CH)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000°C (amostra no fim do ensaio)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)	Pêda CO ₂ (área da curva do CC)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			A	B					
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	1,395	97,22			97,67
Pasta de Referência - 28 dias	88,78	81,96	78,87	2,314	0,4431	73,36			76,11
Pasta com resíduo - 15%	88,73	80,22	77,18	1,954	0,4342	72,44			74,79

Resultados obtidos nas curvas de TG e relação a massa base calculada de resíduo.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterT _{ob+etr} (% de amostra a 200oC)	Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			A	B	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 28 dias	121,02	111,72	107,51	104,36	100,00
Pasta com resíduo - 15%	122,49	110,74	106,54	103,85	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calculada de cimento.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterT _{ob+etr} (% de amostra a 200oC)	Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			A	B	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 28 dias	121,02	111,72	107,51	104,36	100,00
Pasta com resíduo - 15%	142,94	129,23	124,34	121,19	100,00

Cálculo percentual em relação as respectivas massas bases calculadas de cimento.					
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com (T _{ob} +E _{tr})H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
			A	B	
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28	3,26
Pasta de Referência - 28 dias	24,48	16,66	9,30	12,97	1,37
Pasta com resíduo - 15%	19,39	21,76	13,71	12,94	1,59

Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14
Relação a/c

Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.					
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com (T _{ob} +E _{tr})H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
			A	B	
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25	3,17
Pasta de Referência - 28 dias	23,80	16,20	9,04	12,61	1,33
Pasta com resíduo - 15%	18,85	21,15	13,33	12,58	1,55

Valores da reação de hidratação					
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com (T _{ob} +E _{tr})H ₂ O	Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
			A	B	
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 28 dias	24,73	15,27	8,65	11,36	-1,84
Pasta com resíduo - 15%	19,78	20,22	12,94	11,34	-1,62

Tabela B.08 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 15% do cimento Portland - 56 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01
F		
Pasta	Oxidos do Cimento com a substituição (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
	% subst	
Pasta com Resíduo	1,5	85,69
		100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial						
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Before CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000°C (amostra no fim do ensaio)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CH)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H2O (área da curva do CH)		
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	97,22	99,07
Pasta de Referência - 56 dias	90,46	82,89	79,61	2,342	73,56	77,27
Pasta com resíduo - 15%	88,52	81,66	78,52	1,839	73,66	76,68
A B C D E F						

Resultados obtidos nas curvas de TG e relação a massa base calcinada de resíduo.						
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Before CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CH)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda CO2 (área da curva do CC)		
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00	100,00
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	100,00	100,00
Pasta com resíduo - 15%	120,17	110,86	106,60	104,10	100,00	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de cimento.						
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Before CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CH)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda CO2 (área da curva do CC)		
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00	100,00
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	100,00	100,00
Pasta com resíduo - 15%	140,24	129,38	124,40	121,49	100,00	100,00

Cálculo percentual em relação as respectivas massas bases calcinadas de cimento.						
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com CaCO3	
			(Tob+Etr)H2O	Ca(OH)2		
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28	3,26	
Pasta de Referência - 56 dias	23,21	17,93	10,29	13,09	1,35	
Pasta com resíduo - 15%	22,39	18,76	10,87	11,98	1,34	

Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14
 Água para os oxidos de cimento

Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.						
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com CaCO3	
			(Tob+Etr)H2O	Ca(OH)2		
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25	3,17	
Pasta de Referência - 56 dias	22,56	17,44	10,00	12,73	1,32	
Pasta com resíduo - 15%	21,76	18,24	10,57	11,65	1,49	

Valores da reação de hidratação						
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com CaCO3	
			(Tob+Etr)H2O	Ca(OH)2		
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00	
Pasta de Referência - 56 dias	23,50	16,50	9,61	11,48	-1,85	
Pasta com resíduo - 15%	22,70	17,30	10,18	10,40	-1,68	

Tabela B.09 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 20% do cimento Portland - 3 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01
F		
Pasta	Oxido de Cimento com a substituição (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	20	80,87
	97,22	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H2O (área da curva do CH)	
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	97,22
Pasta de Referência - 3 dias	88,60	82,78	80,52	2,293	75,11
Pasta com resíduo - 20%	86,04	80,59	78,30	1,663	73,69
A B C D E F					

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 3 dias	117,96	110,21	107,20	104,15	100,00
Pasta com resíduo - 20%	116,76	109,36	106,26	104,00	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de cimento.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 3 dias	117,96	110,21	107,20	104,15	100,00
Pasta com resíduo - 20%	144,38	135,24	131,40	128,61	100,00

Cálculo percentual em relação as respectivas massas bases calcinadas de cimento.					
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com CaCO3
			Tob+Et/H2O	Ca(OH)2	
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28	3,26
Pasta de Referência - 3 dias	27,33	13,81	7,75	12,55	2,25
Pasta com resíduo - 20%	25,36	15,78	9,15	11,47	3,16
Nota : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14					

Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.					
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com CaCO3
			Tob+Et/H2O	Ca(OH)2	
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25	3,17
Pasta de Referência - 3 dias	26,57	13,43	7,53	12,20	2,19
Pasta com resíduo - 20%	24,66	15,34	8,89	11,16	3,07

Valores da reação de hidratação					
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Água combinada com		Água combinada com CaCO3
			Tob+Et/H2O	Ca(OH)2	
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 3 dias	27,51	12,49	7,14	10,96	-0,98
Pasta com resíduo - 20%	25,59	14,41	8,50	9,91	-0,10

Tabela B.10 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 20% do cimento Portland - 7 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01
F		
Pasta	Oxido de Cimento com a substituição (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	20	80,87
	97,22	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H2O (área da curva do CH)	
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	97,22
Pasta de Referência - 7 dias	89,39	83,22	80,66	1,937	74,78
Pasta com resíduo - 20%	87,72	81,60	79,02	1,619	74,03
A B C D E F					

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 7 dias	119,54	111,29	107,86	105,27	100,00
Pasta com resíduo - 20%	118,49	110,23	106,74	104,55	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de cimento.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
			Be-fone CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)	
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 7 dias	119,54	111,29	107,86	105,27	100,00
Pasta com resíduo - 20%	146,53	136,31	132,00	129,29	100,00

Cálculo percentual em relação as respectivas massas bases calcinadas de cimento.					
Amostra	Água livre	Água combinada com (Tob+Et)/H2O		Água combinada com Ca(OH)2	
		Total de água combinada	CaCO3	Ca(OH)2	CaCO3
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28	3,26
Pasta de Referência - 7 dias	26,88	14,26	8,25	10,65	3,36
Pasta com resíduo - 20%	23,91	17,24	10,22	11,12	3,27

Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14
Reação a/c 40

Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.					
Amostra	Água livre	Água combinada com (Tob+Et)/H2O		Água combinada com Ca(OH)2	
		Total de água combinada	CaCO3	Ca(OH)2	CaCO3
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25	3,17
Pasta de Referência - 7 dias	26,13	13,87	8,02	10,35	2,29
Pasta com resíduo - 20%	23,24	16,76	9,94	10,81	3,18

Valores da reação de hidratação					
Amostra	Água livre	Água combinada com (Tob+Et)/H2O		Água combinada com Ca(OH)2	
		Total de água combinada	CaCO3	Ca(OH)2	CaCO3
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 7 dias	27,07	12,93	7,63	9,11	-0,88
Pasta com resíduo - 20%	24,18	15,82	9,55	9,56	0,01

Tabela B.11 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 20% do cimento Portland - 28 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01
F		
Pasta	Oxido de Cimento com a substituição (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	20	80,87
	97,22	100,00

Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fre CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)	Resíduo at 1000 ^o C (amostra no fim do ensaio)
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	97,22
Pasta de Referência - 28 dias	88,78	81,96	78,87	2,314	73,36
Pasta com resíduo - 20%	87,96	81,02	78,07	1,752	73,46
A					
Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fre CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 28 dias	121,02	111,72	107,51	104,36	100,00
Pasta com resíduo - 20%	119,74	110,29	106,28	103,89	100,00
B					
Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fre CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda CO ₂ (área da curva do CC)	Resíduo at 1000 ^o C (amostra no fim do ensaio)
Cimento	100,00	99,61	99,37	1,395	97,22
Pasta de Referência - 28 dias	88,78	81,96	78,87	0,4431	73,36
Pasta com resíduo - 20%	87,96	81,02	78,07	0,4241	73,46
C					
Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de resíduo.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fre CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 28 dias	121,02	111,72	107,51	104,36	100,00
Pasta com resíduo - 20%	119,74	110,29	106,28	103,89	100,00
D					
Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calcinada de cimento.					
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Be-fre CH (% de amostra no início da curva do CH)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)
Cimento	102,86	102,46	102,21	101,90	100,00
Pasta de Referência - 28 dias	121,02	111,72	107,51	104,36	100,00
Pasta com resíduo - 20%	148,07	136,39	131,42	128,47	100,00
E					

Amostra	Água livre	Água combinada com		Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
		Total de água combinada (Tob+Etr/H ₂ O)	Água combinada com Ca(OH) ₂		
Cimento	0,00	0,96	0,40	1,28	3,26
Pasta de Referência - 28 dias	24,48	16,66	9,30	12,97	1,37
Pasta com resíduo - 20%	21,55	19,60	11,68	12,13	1,62
Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14					
F					

Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.					
Amostra	Água livre	Água combinada com		Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
		Total de água combinada (Tob+Etr/H ₂ O)	Água combinada com Ca(OH) ₂		
Cimento	0,00	0,93	0,39	1,25	3,17
Pasta de Referência - 28 dias	23,80	16,20	9,04	12,61	1,33
Pasta com resíduo - 20%	20,95	19,05	11,36	11,79	1,58
G					

Valores da reação de hidratação					
Amostra	Água livre	Água combinada com		Água combinada com Ca(OH) ₂	Água combinada com CaCO ₃
		Total de água combinada (Tob+Etr/H ₂ O)	Água combinada com Ca(OH) ₂		
Cimento	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 28 dias	24,73	15,27	8,65	11,36	-1,84
Pasta com resíduo - 20%	21,88	18,12	10,97	10,54	-1,59

Tabela B.12 – Parâmetros de hidratação da pasta com substituição de 20% do cimento Portland - 56 dias.

Amostra em 1000oC (%)	Cimento	Resíduo
	97,22	92,01
F		
Pasta	Oxidos do Cimento com a substituição (%)	Oxidos de cimento em relação ao total (%)
Pasta com Resíduo	20	80,87
	97,22	100,00

Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base inicial		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)			
Cimento	100,00	99,61	99,37	0,3037	97,22	99,07	97,67
Pasta de Referência - 56 dias	90,46	82,89	79,61	2,342	73,56	77,27	76,83
Pasta com resíduo - 20%	88,60	81,63	78,55	1,644	73,44	76,91	76,45
A							
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calculada de resíduo.		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)			
Cimento	102,86	102,46	102,21	0,190	100,00	100,46	100,00
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	100,00	104,45	100,00
Pasta com resíduo - 20%	120,64	111,15	106,96	104,72	100,00	104,09	100,00
B							
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calculada de cimento.		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)			
Cimento	102,86	102,46	102,21	0,190	100,00	100,46	100,00
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	100,00	104,45	100,00
Pasta com resíduo - 20%	149,19	137,45	132,26	129,50	100,00	128,72	100,00
C							
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calculada de cimento.		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)			
Cimento	102,86	102,46	102,21	0,190	100,00	100,46	100,00
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	100,00	104,45	100,00
Pasta com resíduo - 20%	149,19	137,45	132,26	129,50	100,00	128,72	100,00
D							
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calculada de cimento.		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)			
Cimento	102,86	102,46	102,21	0,190	100,00	100,46	100,00
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	100,00	104,45	100,00
Pasta com resíduo - 20%	149,19	137,45	132,26	129,50	100,00	128,72	100,00
E							
Amostra	Amostra seca (% de amostra no início do ensaio)	AlterTob+etr (% de amostra a 200oC)	Resultados obtidos nas curvas de TG em relação a massa base calculada de cimento.		Resíduo at 1000oC (amostra no fim do ensaio)	Alter CH (% de amostra no fim da curva do CH)	Alter CC (% de amostra no fim da curva do CC)
			Before CH (% de amostra no início da curva do CH)	Perda H ₂ O (área da curva do CH)			
Cimento	102,86	102,46	102,21	0,190	100,00	100,46	100,00
Pasta de Referência - 56 dias	122,97	112,68	108,22	105,04	100,00	104,45	100,00
Pasta com resíduo - 20%	149,19	137,45	132,26	129,50	100,00	128,72	100,00
F							

Amostra	Água livre	Total de água combinada	Cálculo percentual em relação às respectivas massas bases calculadas de cimento.	
			Água combinada com (Tob+Et+H ₂ O)	Água combinada com Ca(OH) ₂
Cimento	0,00	0,96	0,40	3,26
Pasta de Referência - 56 dias	23,21	17,93	10,29	1,35
Pasta com resíduo - 20%	21,45	19,69	11,74	1,76
Note : Total de água adicionada na massa de cimento e resíduo = 41,14				
Reação a/c				

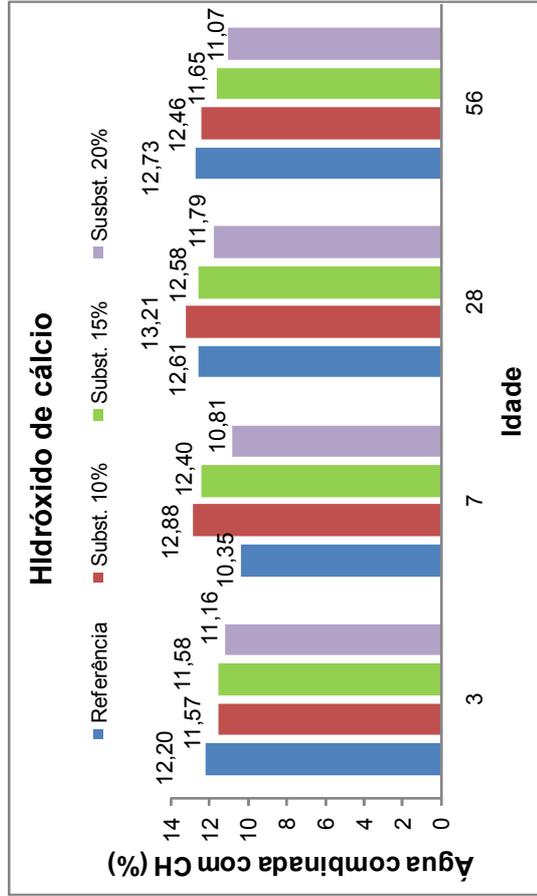
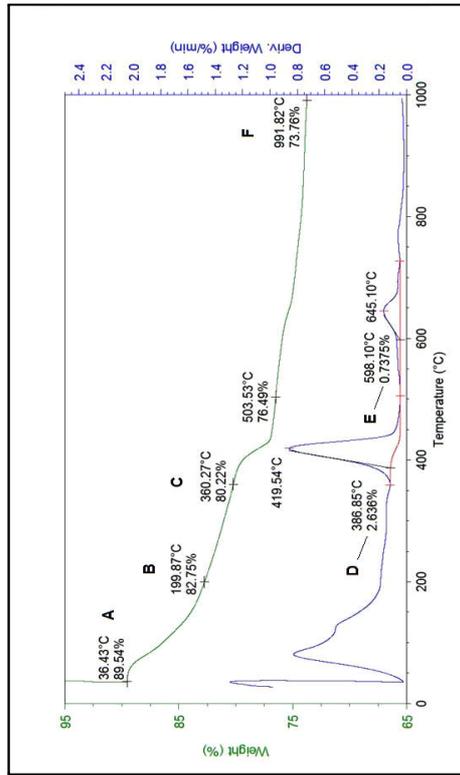
Amostra	Água livre	Total de água combinada	Cálculo percentual em relação massa base inicial de cimento.	
			Água combinada com (Tob+Et+H ₂ O)	Água combinada com Ca(OH) ₂
Cimento	0,00	0,93	0,39	3,17
Pasta de Referência - 56 dias	22,56	17,44	10,00	1,32
Pasta com resíduo - 20%	20,86	19,14	11,41	1,71

Amostra	Água livre	Total de água combinada	Valores da reação de hidratação	
			Água combinada com (Tob+Et+H ₂ O)	Água combinada com Ca(OH) ₂
Cimento	0	0,00	0,00	0,00
Pasta de Referência - 56 dias	23,50	16,50	9,61	11,48
Pasta com resíduo - 20%	21,79	18,21	11,02	9,82

Tabela B.13 – Resumo dos valores de perda de massa das curvas TG/DTG e água quimicamente combinado com o hidróxido de cálcio.

Cimento	P						10,00%						15,00%						20%													
	3 dias		7 dias		28 dias		3 dias		7 dias		28 dias		3 dias		7 dias		28 dias		3 dias		7 dias		28 dias		3 dias		7 dias		28 dias		56 dias	
	% no início do ensaio	% em 200 graus	% no início da curva do hidróxido de cálcio	Area do hidróxido de cálcio	Area do Carbonato de cálcio	% no fim do ensaio																										
A	92,01	88,60	89,39	88,78	90,46	91,56	86,70	90,29	90,53	88,24	88,73	88,52	85,54	88,24	88,73	88,52	86,04	87,72	85,04	87,72	86,04	87,72	87,96	88,60	88,60	88,60	88,60	88,60	88,60	88,60	88,60	
B	99,61	82,78	83,22	81,96	82,89	84,77	80,41	81,52	83,53	81,46	80,22	81,66	80,02	81,46	80,22	81,66	80,59	81,60	80,59	81,60	80,59	81,60	81,02	81,63	81,63	81,63	81,63	81,63	81,63	81,63	81,63	
C	99,37	80,52	80,66	78,87	79,61	82,11	77,70	78,24	80,28	78,64	77,18	78,52	77,66	78,64	77,18	78,52	78,30	79,02	78,30	79,02	78,30	79,02	78,07	78,55	78,55	78,55	78,55	78,55	78,55	78,55	78,55	
D	0,3037	2,293	1,937	2,314	2,342	1,995	2,121	2,180	2,113	1,952	1,954	1,812	1,812	1,952	1,954	1,839	1,663	1,619	1,663	1,619	1,663	1,752	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	
E	1,395	0,7451	0,7755	0,4431	0,4381	0,9868	0,6151	0,445	0,4754	0,6638	0,4342	0,4268	0,7657	0,6638	0,4342	0,4268	0,8287	0,8616	0,8287	0,8616	0,8287	0,8616	0,4241	0,4589	0,4589	0,4589	0,4589	0,4589	0,4589	0,4589	0,4589	
F	97,22	75,11	74,78	73,36	73,56	76,16	72,74	72,88	74,91	73,01	73,42	72,44	73,01	73,42	72,44	73,66	73,69	74,03	73,69	74,03	73,69	74,03	73,46	73,44	73,44	73,44	73,44	73,44	73,44	73,44	73,44	

Quantidade de Hidróxido de Cálcio	1,25	12,20	10,35	12,61	12,73	11,57	12,88	13,21	12,46	11,58	12,40	12,58	11,65	11,16	10,81	11,79	11,07
-----------------------------------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



APÊNDICE C – TABELAS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO TOTAL E
POR CAPILARIDADE

Tabela C.01 – Parâmetros do ensaio de absorção por imersão total.

Ensaio: Absorção por imersão total																																										
Dados da amostra	Condições de ensaio																																									
<table border="1"> <tr> <td>Matrix:</td> <td>Tipo:</td> <td>Cura:</td> </tr> <tr> <td>argamassa</td> <td>moldado</td> <td>câmara úmida</td> </tr> <tr> <td>Idade inicial:</td> <td>Geometria:</td> <td>Dimensão:</td> <td>Vol. (cm³):</td> </tr> <tr> <td>28 dias</td> <td>Cilíndrica</td> <td>φ5 x 10 cm</td> <td>196,35</td> </tr> </table>	Matrix:	Tipo:	Cura:	argamassa	moldado	câmara úmida	Idade inicial:	Geometria:	Dimensão:	Vol. (cm³):	28 dias	Cilíndrica	φ5 x 10 cm	196,35	<table border="1"> <tr> <th rowspan="2">Amostra</th> <th>Temperatura</th> <th>Tempo de</th> <th>tempo de</th> </tr> <tr> <th>estufa</th> <th>imersão</th> <th>ebulição</th> </tr> <tr> <td></td> <td>°C</td> <td>h</td> <td>h</td> </tr> <tr> <td>Referência</td> <td>60</td> <td>72</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Subst. 10 %</td> <td>60</td> <td>72</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Subst. 15 %</td> <td>60</td> <td>72</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Subst. 20 %</td> <td>60</td> <td>72</td> <td>5</td> </tr> </table>	Amostra	Temperatura	Tempo de	tempo de	estufa	imersão	ebulição		°C	h	h	Referência	60	72	5	Subst. 10 %	60	72	5	Subst. 15 %	60	72	5	Subst. 20 %	60	72	5
Matrix:	Tipo:	Cura:																																								
argamassa	moldado	câmara úmida																																								
Idade inicial:	Geometria:	Dimensão:	Vol. (cm³):																																							
28 dias	Cilíndrica	φ5 x 10 cm	196,35																																							
Amostra	Temperatura	Tempo de	tempo de																																							
	estufa	imersão	ebulição																																							
	°C	h	h																																							
Referência	60	72	5																																							
Subst. 10 %	60	72	5																																							
Subst. 15 %	60	72	5																																							
Subst. 20 %	60	72	5																																							

Índices físicos

Amostra		Massa seca	Mas. hidrost.	Mas. sat.	Absorção	Índice de	Mas. esp.	Mas. esp.	Mas. esp.
		(Ms)	(Mi)	sup. seca	(A)	vazios	seca	sat.	real
		g	g	g	%	(lv)	(ps)	(psat)	(pr)
							g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
Referência	1	410,63	233,54	426,63	3,896	8,286	2,127	2,209	2,319
	2	417,85	238,88	434,16	3,903	8,352	2,140	2,223	2,335
	3	409,82	232,55	426,05	3,960	8,388	2,118	2,202	2,312
	4	415,48	236,69	431,65	3,892	8,294	2,131	2,214	2,324
		Média			3,913	8,330	2,129	2,212	2,322
Substituição 10 %	1	414,22	234,63	428,60	3,472	7,414	2,135	2,210	2,306
	2	406,44	227,29	421,35	3,668	7,683	2,094	2,171	2,269
	3	421,74	238,77	436,24	3,438	7,343	2,136	2,209	2,305
	4	409,63	231,04	424,81	3,706	7,834	2,114	2,192	2,294
		Média			3,571	7,568	2,120	2,196	2,293
Substituição 15 %	1	408,90	229,14	422,75	3,387	7,154	2,112	2,184	2,275
	2	408,86	229,09	422,84	3,419	7,215	2,110	2,182	2,274
	3	401,75	222,02	416,09	3,569	7,389	2,070	2,144	2,235
	4	406,30	226,09	419,95	3,360	7,041	2,096	2,166	2,255
		Média			3,434	7,200	2,097	2,169	2,260
Substituição 20 %	1	417,59	238,36	430,87	3,180	6,898	2,169	2,238	2,330
	2	416,31	237,09	429,69	3,214	6,947	2,162	2,231	2,323
	3	414,08	235,50	427,36	3,207	6,922	2,158	2,227	2,319
	4	414,51	236,08	427,90	3,230	6,981	2,161	2,231	2,323
		Média			3,208	6,937	2,162	2,232	2,324

Amostra	Absorção (A)	Índice de vazios (lv)	Mas. esp. real (pr)	Mas. esp. seca (ps)	Mas. esp. sat. (psat)
	%	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
Referência	3,91	8,33	2,32	2,13	2,21
Subst. 10 %	3,57	7,57	2,29	2,12	2,20
Subst. 15 %	3,43	7,20	2,26	2,10	2,17
Subst. 20 %	3,21	6,94	2,32	2,16	2,23

APÊNDICE D – MORFOLOGIA DO RVM BASE (INICIAL) APÓS MOAGEM EM
PULVERIZADOR DE ROTOR

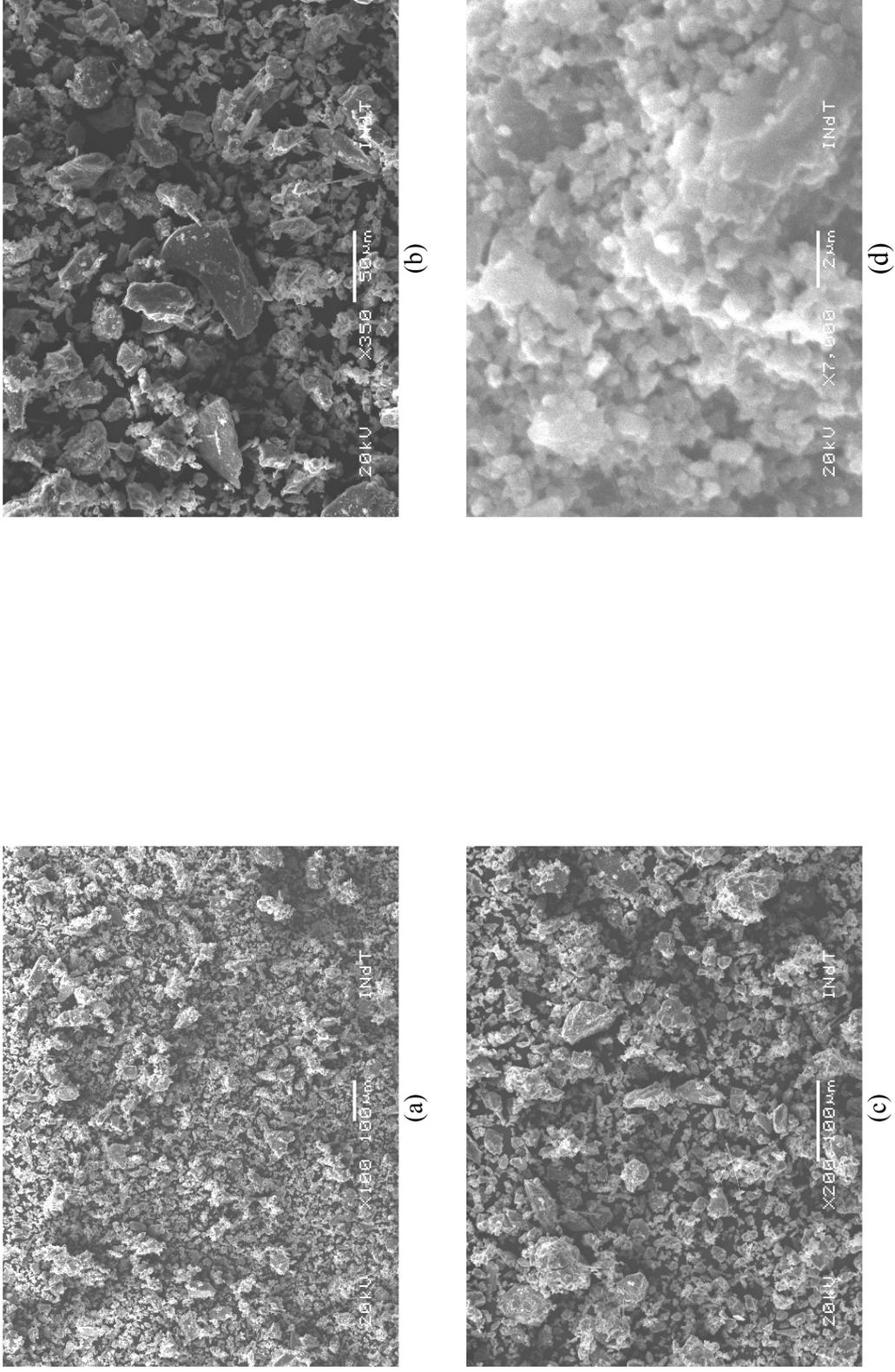


Figura D.01 – Micrografia do RVM inicial (base) no MEV: (a) 100 veze de aumento; (b) 350 veze de aumento; (c) 200 veze de aumento e; (d) 7.000 veze de aumento.

ANEXO

ANEXO A – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA

Tabela A.01 – Ficha de ensaio granulométrico do agregado miúdo (areia A).



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Civil
Laboratório de Estruturas

Análise Granulométrica - Agregado miúdo (NBR NM 248)

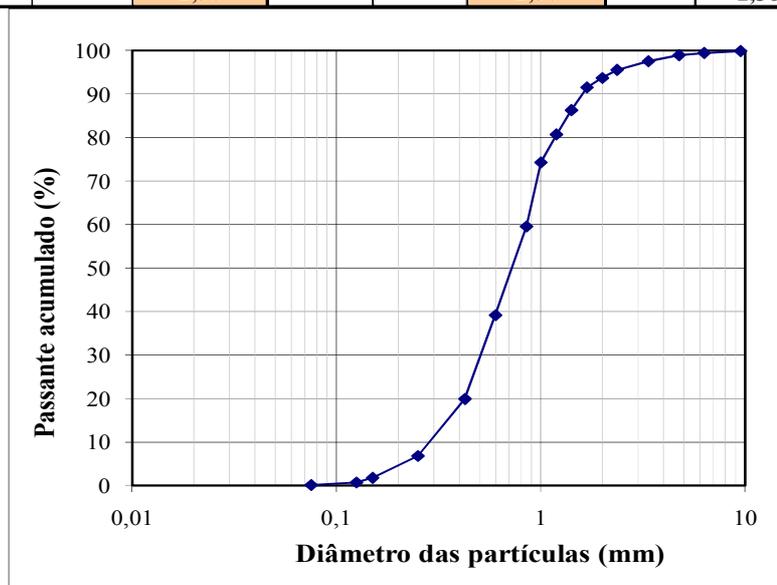
Data: 04/07/2005

Amostra

: Areia do Rio Guandu

		0,3%	
M1	437,70	1,3	1,0
M2	411,40	1,2	0,3

Peneiras	M1			M2			% Retida média	% Retida acumulada média	% Passante acumulado
	Amostra (g)	% Retida	% Retida acumulada	Amostra (g)	% Retida	% Retida acumulada			
9,5	0,0	0,0	0	0,0	0,2	0	0	0	100
6,30	1,7	0,4	0	0,8	0,5	1	0	1	99
4,75	1,7	0,4	1	2,2	0,6	1	0	1	99
3,36	4,5	1,0	2	2,5	1,8	3	1	2	98
2,36	7,7	1,8	4	7,3	2,2	5	2	4	96
2,00	9,4	2,1	6	9,1	1,6	7	2	6	94
1,68	8,6	2,0	8	6,6	2,3	9	2	8	92
1,41	11,8	2,7	10	9,7	7,8	17	5	14	86
1,19	34,3	7,9	18	32,0	3,3	20	6	19	81
1,00	16,4	3,8	22	13,6	9,1	29	6	26	74
0,850	37,2	8,5	30	37,3	20,9	50	15	40	60
0,600	97,5	22,3	53	86,1	18,5	69	20	61	39
0,425	81,9	18,7	72	75,9	19,7	89	19	80	20
0,250	79,8	18,3	90	81,1	8,0	97	13	93	7
0,150	34,7	7,9	98	32,8	2,1	99	5	98	2
0,125	4,9	1,1	99	8,8	1,0	100	1	99	1
0,075	3,8	0,9	100	4,1	0,3	100	1	100	0
fundo	1,1	0,3	100	1,3	0,3	100	0	100	0
Total	436,7	100,0		411,1	100,0		100		
MF			2,6			2,9			2,8
DMC			2,36			2,36			2,36



Fonte: FONTES, C. M. A. Utilização das cinzas de lodo de esgoto e de resíduo sólido urbano em concretos de alto desempenho. Tese de D. Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 294 p, 2008.

ANEXO B – ENSAIO DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Tabela B.01 – Dados obtidos do ensaio de porosimetria da pastas de referência com cimento.



POROSIMETRIA DE MERCÚRIO

PO-GT-5061

AUTOPORE II 9220 V3.06

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	DATA2 /399	Amostra n°:	120259	Tipo:	Pasta
OPERATOR:	Janaina	LP:	14:34:54	-	03/26/09
SAMPLE ID:	120259	HP:	16:14:12	-	03/26/09
SUBMITTER:	Argamassa	REP:	17:11:34	-	03/30/09

PENETROMETER NUMBER:	92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER CONSTANT:	10,7900	$\mu\text{L}/\rho\text{F}$	RECEDING CONTACT ANGLE:	130,00 deg
PENETROMETER WEIGHT:	70,0200	g	MERCURY SURFACE TENSION:	485,00 dyn/cm
STEM VOLUME:	0,3920	mL	MERCURY DENSITY:	13,5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE:	4,4500	psia	SAMPLE WEIGHT:	2,2500 g
PENETROMETER VOLUME:	5,9083	mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT:	134,3400 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50	μmHg
EVACUATION TIME:	5	min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1,5182	psia
EQUILIBRATION TIME:	15	sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	15	sec
---------------------	-----------	-----

INTRUSION DATA SUMMARY

(FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0,1563	mL/g
TOTAL PORE AREA =	28,4400	sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0,0526	μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0,0089	μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0,0220	μm
BULK DENSITY =	1,7021	g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2,3189	g/mL
POROSITY =	26,60	%
STEM VOLUME USED =	90,00	%

Tabela B.02 – Ficha do ensaio de porosimetria da pasta com substituição de 10% do cimento.



POROSIMETRIA DE MERCÚRIO

PO-GT-5061

AUTOPORE II 9220 V3.06

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	DATA2 /400	Amostra n°:	120285	Tipo:	Pasta
OPERATOR:	Janaina	LP:	10:11:29	-	03/27/09
SAMPLE ID:	120285	HP:	15:47:32	-	03/27/09
SUBMITTER:	Argamassa	REP:	17:16:13	-	03/30/09

PENETROMETER NUMBER:	92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER CONSTANT:	10,7900	$\mu\text{L/pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE:	130,00 deg
PENETROMETER WEIGHT:	69,9100	g	MERCURY SURFACE TENSION:	485,00 dyn/cm
STEM VOLUME:	0,3920	mL	MERCURY DENSITY:	13,5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE:	4,4500	psia	SAMPLE WEIGHT:	1,8500 g
PENETROMETER VOLUME:	6,0331	mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT:	137,5800 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50	μmHg
EVACUATION TIME:	5	min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1,5070	psia
EQUILIBRATION TIME:	15	sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	15	sec
---------------------	-----------	-----

INTRUSION DATA SUMMARY

(FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0,1745	mL/g
TOTAL PORE AREA =	30,3490	sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0,0559	μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0,0099	μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0,0230	μm
BULK DENSITY =	1,5817	g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2,1848	g/mL
POROSITY =	27,60	%
STEM VOLUME USED =	82,00	%

Tabela B.03 – Ficha do ensaio de porosimetria da pasta com substituição de 15% do cimento.



POROSIMETRIA DE MERCÚRIO

PO-GT-5061

AUTOPORE II 9220 V3.06

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	DATA3 /1	Amostra nº:	120286	Tipo:	Pasta
OPERATOR:	Janaina	LP:	10:16:06	-	03/30/09
SAMPLE ID:	120286	HP:	11:34:38	-	03/30/09
SUBMITTER:	Argamassa	REP:	17:22:15	-	03/30/09

PENETROMETER NUMBER:	92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER CONSTANT:	10,7900 $\mu\text{L}/\rho\text{F}$	RECEDING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER WEIGHT:	70,0600 g	MERCURY SURFACE TENSION:	485,00	dyn/cm
STEM VOLUME:	0,3920 mL	MERCURY DENSITY:	13,5335	g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE:	4,4500 psia	SAMPLE WEIGHT:	1,6300	g
PENETROMETER VOLUME:	5,9083 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT:	138,0000	g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50	μmHg
EVACUATION TIME:	5	min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1,5118	psia
EQUILIBRATION TIME:	15	sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	15	sec
---------------------	-----------	-----

INTRUSION DATA SUMMARY

(FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0,1681	mL/g
TOTAL PORE AREA =	32,2640	sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0,0486	μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0,0089	μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0,0208	μm
BULK DENSITY =	1,6161	g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2,2190	g/mL
POROSITY =	27,17	%
STEM VOLUME USED =	70,00	%

Tabela B.04 – Ficha do ensaio de porosimetria da pasta com substituição de 20% do cimento.



POROSIMETRIA DE MERCÚRIO

PO-GT-5061

AUTOPORE II 9220 V3.06

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER:	DATA3 /12	Amostra n°:	120287	Tipo:	Pasta
OPERATOR:	Janaina	LP:	15:48:46	-	04/27/09
SAMPLE ID:	120287	HP:	17:09:47	-	04/27/09
SUBMITTER:	Argamassa	REP:	17:20:41	-	04/27/09

PENETROMETER NUMBER:	92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE:	130,00	deg
PENETROMETER CONSTANT:	10,7900	$\mu\text{L}/\rho\text{F}$	RECEDING CONTACT ANGLE:	130,00 deg
PENETROMETER WEIGHT:	70,0100	g	MERCURY SURFACE TENSION:	485,00 dyn/cm
STEM VOLUME:	0,3920	mL	MERCURY DENSITY:	13,5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE:	4,4500	psia	SAMPLE WEIGHT:	1,8700 g
PENETROMETER VOLUME:	5,9083	mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT:	136,2500 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50	μmHg
EVACUATION TIME:	5	min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1,5166	psia
EQUILIBRATION TIME:	15	sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	15	sec
---------------------	-----------	-----

INTRUSION DATA SUMMARY

(FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0,1792	mL/g
TOTAL PORE AREA =	37,0050	sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0,0429	μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0,0083	μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0,0194	μm
BULK DENSITY =	1,6233	g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2,2893	g/mL
POROSITY =	29,09	%
STEM VOLUME USED =	85,00	%

ANEXO C – ENSAIO DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BARRAS DE
ARGAMASSA

Tabela C.01 – Ficha de ensaio de reação álcalis-agregado com substituição de 20% do cimento Portland.

 Associação Brasileira de Cimento Portland	ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 55060	1/4
	Interessado: Raimundo Pereira Vasconcelos Endereço: Av. Rodrigo Octavio Jordão, 3000 Manaus/AM CEP 69077-000 Referência: CNPq – Processo nº 485318/2007/	

Amostras nº: 120255	Data de entrada: 10/02/09
Material declarado: Resíduo de vidro	
Período de realização dos ensaios: 10/02/09 a 14/04/09	
Objetivo: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado	

TABELA 1 – Composição dos materiais

Abertura nominal das peneiras (mm)	Massa (g)	
Agregado	4,8 - 2,4	99,0
	2,4 - 1,2	247,5
	1,2 - 0,6	247,5
	0,6 - 0,3	247,5
	0,3 - 0,15	148,5
Cimento	440,0	
Água destilada (a/c = 0,47)	206,8	

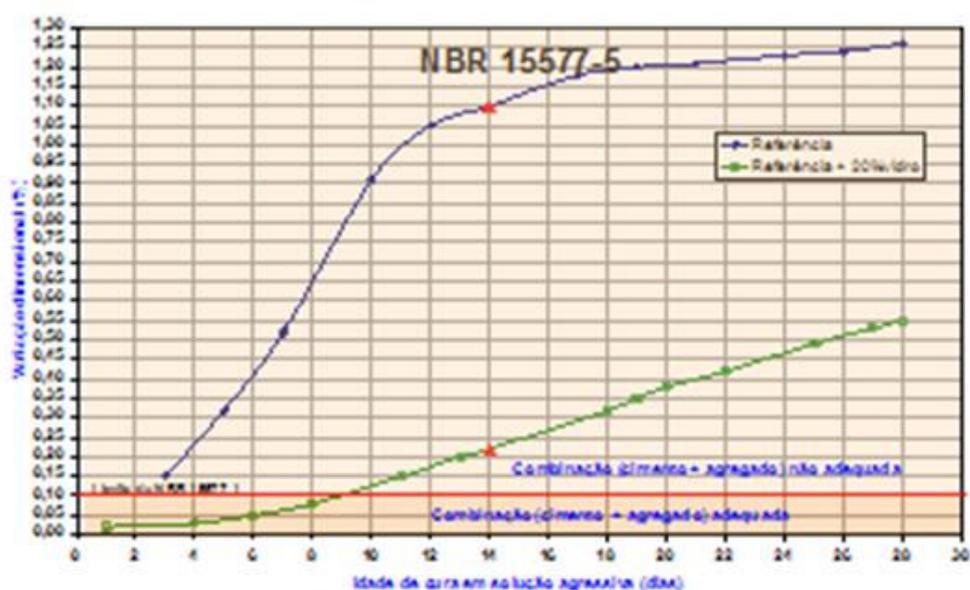


FIGURA 1 - Gráfico de evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina

Este documento tem significação restrita e de respeito (ão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s)). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Ju. Torres de Oliveira, 74 - CEP 02247-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 2760-2900 - Fax (11) 2760-2940 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

Tabela C.02 – Resultados de variação dimensional das barras de argamassa - RAA.



3/5

Relatório de ensaio nº 55060

TABELA 2 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina

Idade de Cura agressiva (dias)(*)	Referência	Referência + 20%vidro
1	-	0,02
2	-	-
3	0,15	-
4	-	0,03
5	0,32	-
6	-	0,05
7	0,52	-
8	-	0,08
9	-	-
10	0,91	-
11	-	0,15
12	1,05	-
13	-	0,20
14	1,10	0,22
15	-	-
16	-	-
17	1,18	-
18	-	0,32
19	1,20	0,35
20	-	0,38
21	1,21	-
22	-	0,42
23	-	-
24	1,23	-
25	-	0,49
26	1,24	-
27	-	0,53
28	1,26	0,55

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias