



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado



"Utilização do resíduo gerado na exploração do itabirito em substituição ao agregado miúdo natural para preparação de argamassa de cimento Portland"



Autora: Valéria Alves Rodrigues de Melo
Orientador: Dr. Fernando Soares Lameiras

Março de 2012



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Valéria Alves Rodrigues de Melo

"Utilização do resíduo gerado na exploração do itabirito em substituição ao agregado miúdo natural para preparação de argamassa de cimento Portland"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação

Orientador: Dr. Fernando Soares Lameiras

Belo Horizonte, março de 2012

Folha de aprovação

Este trabalho foi desenvolvido em sua maior parte no Laboratório de Cimentação do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, sob a orientação do Prof. Doutor Fernando Soares Lameiras e com o auxílio do Técnico Francisco Donizete Candido.

“Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros ou TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas próprias árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser; que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos e simplesmente ir ver”.

Amyr Klink

Agradecimentos

Se algum mérito for atribuído a este trabalho, certamente deverá ser dividido com muitas pessoas, que, embora não necessariamente compartilhem das posições, idéias e eventuais deslizes desta autora neste trabalho, contribuíram imensamente para sua elaboração. Então, minha sincera gratidão:

Ao Prof. Dr. Fernando Soares Lameiras, orientador prestimoso e incentivador incondicional do sucesso de seus alunos, meu agradecimento não só pelas valiosas lições no campo das ciências, mas também pelo agradável convívio e pela enorme paciência.

À meus pais Wilson e Maria Augusta, irmãos Wilson Jr., William e Vanessa e à Maristela que de diversas maneiras, não só no apoio ao desenvolvimento deste trabalho, muito contribuem para meu crescimento e felicidade.

À Mestre Carolina Braccini Freire, sem a qual este trabalho não poderia ter sido desenvolvido. Registro aqui meus sinceros agradecimentos.

Ao amigo canceriano Donizete pela enorme força (literalmente), disponibilidade, disposição e alegria ao contribuir com o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Schubert, um grande exemplo de dedicação e competência.

À Prof. Dra. Clédola Cássia Oliveira de Tello por disponibilizar a estrutura do LABCIM e pelos valiosos conselhos durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos demais colegas do LABCIM que me acompanharam nesta longa jornada.

Às Prof^{as} Dras. Clascídia Aparecida Furtado e Adelina Pinheiro Santos por disponibilizarem equipamentos de seus laboratórios.

Ao Msc. Daniel Andrada Maria, Luis Carlos da Silva, Ana Maria Pena e Luis Rodrigues Armoa Garcia, pela realização de ensaios.

A José Aury de Aquino, José Donato de Souza e Waldeir Estevão de Paula Jr., pelo apoio na preparação e caracterização do resíduo.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálises (Consórcio Física-Química-Geologia/UFMG - CDTN/CNEN), pela realização de ensaios.

Aos pesquisadores Dr. Wilmar Barbosa Ferraz, Dra. Ana Maria Matildes dos Santos e Dra. Denise das Mercês Camarano, pelas valiosas contribuições e pelo enorme carinho.

À Sônia Pinto Prates, que sempre me atendeu prontamente.

Ao grande amigo Carlos por tudo de bom que me proporcionou e por todo o apoio.

Aos amigos Ana Paula, Andréa, Adalberto, Eduardo, Marcus Vinícius, Otávio, Patrícia, Paulo Henrique e Vânia pelo grande apoio e amizade.

Aos amigos que fiz durante o curso, em especial à Michelle Duarte, Caio Motta, Euclides Martins, Camila Gonçalves e Erika Marinho.

Aos amigos que não se envolveram diretamente no desenvolvimento deste trabalho, mas que estiveram presentes em minha vida.

Ao CDTN, pela disponibilização de toda sua infraestrutura.

À REDEMAT, por seu ótimo programa de pós graduação.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudo.

À CAPES, pela disponibilização de acesso ao seu banco de dados.

À FUNDEP e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro ao projeto.

À SAMARCO, pela disponibilização de amostras e informações.

Muito obrigada a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho!

Sumário

Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	x
Lista de abreviações	xi
Lista de símbolos	xii
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1. Introdução	1
2. Objetivos	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. Revisão Bibliográfica.....	4
3.1 Beneficiamento do itabirito	4
3.2 Argamassa de cimento Portland	6
3.2.1 Componentes principais.....	7
3.2.2 Microestrutura da argamassa de cimento Portland	18
4. Parte Experimental.....	20
4.1 Planejamento experimental.....	20
4.2 Caracterização do resíduo arenoso	22
4.3 Argamassa	24
4.3.1 Materiais componentes	24
4.3.2 Composição.....	26
4.3.3 Preparação, moldagem e cura da argamassa.....	26
4.3.4 Caracterização da argamassa	27
5. Resultados e discussão	30
5.1 Caracterização do resíduo arenoso	30
5.2 Argamassa fresca.....	34
5.3 Argamassa endurecida.....	39
6. Conclusões	62
7. Sugestões para trabalhos futuros.....	64
8. Referências Bibliográficas	65
9. Anexos	69

Lista de figuras

Figura 3-1 – Fluxograma das etapas envolvidas no processamento mineral do itabirito empregado pela Samarco Mineração	5
Figura 3-2 – Vista da Barragem Germano de resíduos em Mariana, MG	6
Figura 3-3 – Dependência entre a resistência e a relação a/c	11
Figura 3-4 – Esquema ilustrativo para orientar a avaliação da forma dos grãos de agregado .	13
Figura 4-1 – Fluxograma representando a sequência de experimentos executados para este trabalho	22
Figura 4-2 – Foto do processo de homogeneização	23
Figura 5-1 – Resíduo arenoso.....	30
Figura 5-2 – Difratoograma de raios X do resíduo arenoso	31
Figura 5-3 – Espectro na região do infravermelho do resíduo arenoso disperso em KBr	31
Figura 5-4 – Curva granulométrica do resíduo arenoso com representação das porcentagens em massa retidas em cada peneira e das porcentagens retidas acumuladas	33
Figura 5-5 – Resíduo arenoso visto por lupa com aumento de 50x	34
Figura 5-6 – Aspecto das argamassas preparadas	36
Figura 5-7 – Apresentação geométrica dos resultados de tempo de pega (minutos)	38
Figura 5-8 – Apresentação geométrica dos resultados de densidade da pasta (g.cm^{-3})	38
Figura 5-9 – Apresentação geométrica dos resultados de viscosidade	39
Figura 5-10 – Carta de Pareto dos efeitos padronizados da viscosidade	39
Figura 5-11 – Carta de Pareto dos efeitos padronizados da resistência à compressão.....	40
Figura 5-12 – Apresentação geométrica dos resultados de resistência à compressão	41
Figura 5-13 – Resultados de densidade dos corpos de prova aos 7, 28 e 91 dias de cura	41
Figura 5-14 – Cartas de Pareto dos efeitos padronizados da densidade dos corpos de prova .	42
Figura 5-15 – Apresentação geométrica dos resultados de densidade (g.cm^{-3}) dos corpos de prova.....	42
Figura 5-16 – Apresentação geométrica dos resultados de absorção de água	43
Figura 5-17 – Carta de Pareto dos efeitos padronizados da absorção de água.....	43
Figura 5-18 – Cartas de Pareto dos efeitos padronizados para o índice de vazios.....	44
Figura 5-19 – Apresentação geométrica dos resultados de índice de vazios (%)	44
Figura 5-20 – Cartas de Pareto dos efeitos padronizados da massa específica.....	44
Figura 5-21 – Apresentação geométrica dos resultados de massa específica (g.cm^{-3})	45

Figura 5-22 – Resistência média à compressão em função do índice de vazios das formulações em estudo.....	45
Figura 5-23 – Difratoograma de raios X das oito composições preparadas aos 70 dias de cura	46
Figura 5-24 – Micrografias das amostras preparadas com cada formulação aos 70 dias de cura com aumento de 50x	47
Figura 5-25 – Micrografia da superfície da fratura de amostra da formulação 1 com aumento de 200x	49
Figura 5-26 – Micrografias das superfícies das fraturas de amostras da formulação 1	50
Figura 5-27 – Micrografias das superfícies das fraturas de amostras da formulação 2	51
Figura 5-28 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 2 com aumento de 1.500x e resultados de EDS.....	52
Figura 5-29 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 3	53
Figura 5-30 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 3 com aumento de 3.500x e resultados de EDS.....	54
Figura 5-31 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 4.....	55
Figura 5-32 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 5	56
Figura 5-33 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 5 com aumento de 1.500x e resultados de EDS.....	57
Figura 5-34 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 6	58
Figura 5-35 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 6 com aumento de 1.000x e resultados de EDS.....	59
Figura 5-36 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 7	60
Figura 5-37 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 8.....	61

Lista de tabelas

Tabela 3-1 – Principais tipos de cimento utilizados no Brasil	9
Tabela 3-2 - Alguns constituintes potencialmente deletérios encontrados em agregados	16
Tabela 4-1 – Fatores e níveis considerados na etapa de planejamento dos experimentos	21
Tabela 4-2 – Análise química do cimento CII E 32 empregado neste estudo	25
Tabela 4-3 – Análise química do cimento CII V ARI empregado neste estudo	25
Tabela 4-4 – Características do aditivo SIKA VISCOCRETE 20 HE.....	26
Tabela 4-5 – Composição das argamassas preparadas seguindo planejamento fatorial	26
Tabela 5-1 – Proporção das fases presentes no resíduo arenoso	31
Tabela 5-2 – Resultados da análise granulométrica do resíduo arenoso	32
Tabela 5-3 – Composição das argamassas preparadas	35
Tabela 5-4 – Propriedades da argamassa fresca	37
Tabela 5-5 – Propriedades da argamassa endurecida	39
Tabela 5-6 – Propriedades da argamassa endurecida	40

Lista de abreviações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BIF – Banded Iron Formation

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

DRX/XRD – Difração de raios X

FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

FUNDEP – Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa

ICDD – International Center for Diffraction Data

LABCIM – Laboratório de Cimentação

m – média amostral

MEV/SEM – Microscopia eletrônica por varredura

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

Relação a/c – relação entre a massa de água e a massa de cimento

S – desvio padrão amostral

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

Lista de símbolos

C_3A – Aluminato tricálcico ($Ca_3Al_2O_6$)

$C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ – Etringita (Sulfoaluminato tricálcico)

C_3AH_6 – Aluminatos de cálcio hidratados

C_3S – Alita (silicato tricálcico - Ca_3SiO_5)

C_4AF – Celita (ferroaluminato tetracálcico – Ca_2AlFeO_5)

CH – Portlandita (hidróxido de cálcio - $Ca(OH)_2$)

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

M_4AH_{10} – Aluminato de magnésio hidratado

β - C_2S – Belita (beta-silicato dicálcico - β - Ca_2SiO_4)

Resumo

Os agregados miúdos naturais são materiais utilizados na construção civil para a preparação de argamassas e concretos. Em função das restrições legais impostas à sua extração, tem-se buscado meios para substituí-los. Como alternativa, é proposto o emprego do resíduo arenoso gerado na extração do itabirito (minério de ferro). O beneficiamento do itabirito requer sua moagem e flotação para concentrar os óxidos de ferro. Nesse processo são geradas grandes quantidades do resíduo arenoso, constituído por quartzo e óxidos de ferro. Visando ao seu aproveitamento e à redução do consumo de agregados miúdos naturais, o resíduo arenoso foi caracterizado quanto à composição mineralógica, distribuição granulométrica, presença de impurezas orgânicas e forma das partículas. Foram preparadas formulações de argamassa variando o tipo de cimento, o traço e a relação água/cimento (a/c). Os produtos obtidos foram caracterizados através de medidas de viscosidade e densidade da pasta, tempo de pega, densidade, resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Complementarmente, foi feita a caracterização microestrutural por DRX e MEV. Constatou-se que o tipo de cimento tem influência significativa sobre a resistência à compressão e a massa específica aos 28 dias. Resistências de até 19,5MPa aos 28 dias são alcançadas com a utilização de cimento CPV, a/c 0,80 e traço 1:2. Os resultados comprovam a possibilidade de utilização desse resíduo como agregado miúdo.

Abstract

The fine natural aggregates are a material largely used by the civil construction for mortar and concrete production. Due to tightening legal restrictions imposed on their extraction, alternative materials are being considered. The use of sandy residue from BIF (banded iron formations) exploitation as iron ore was investigated. It requires their grinding and flotation to concentrate iron oxides. Large amounts of sandy residue composed of quartz and iron oxides are generated in this process. The sandy residue was characterized relative to mineralogical composition, particle size distribution, presence of organic impurities, and particle shape. Mortar formulations were prepared by varying the type of cement, the cement to aggregate proportion and the water/cement ratio (a/c). The products were characterized by measuring the viscosity, density, setting time, compressive strength and water absorption. In addition, microstructural characterization was performed by XRD and SEM. The type of cement has a significant influence on the compressive strength and specific mass at 28 days. Compressive strength up to 19.5 MPa were achieved with the use of cement CPV, a/c ratio of 0.80 and cement:aggregate proportion of 1:2. The results demonstrate the technical feasibility of using sandy residue as fine aggregate.

1. Introdução

O principal agregado miúdo utilizado na construção civil é a areia natural, extraída de leito de rios, várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, pegmatitos e arenitos decompostos. Diversas restrições legais à extração desse material vêm sendo impostas devido ao impacto ambiental gerado por essa atividade. Nesse contexto, muitos trabalhos propõem a substituição de agregados miúdos naturais por outros materiais com a finalidade de diminuir os impactos gerados pela extração da areia e aproveitar resíduos gerados em outros segmentos. Neste trabalho é proposta a substituição dos agregados miúdos naturais pelo resíduo arenoso gerado no beneficiamento do itabirito.

O itabirito é uma rocha metamórfica que ocorre em grandes extensões no Brasil e é explorado como minério de ferro. Em seu beneficiamento para concentração dos óxidos de ferro pelo processo de flotação são gerados dois resíduos principais, o resíduo argiloso e o resíduo arenoso, que são depositados em barragem de resíduos ou utilizados para preenchimento de cavas de mineração.

O resíduo arenoso tem características físicas e químicas muito uniformes e é produzido em grandes quantidades. A uniformidade das suas características e a sua grande disponibilidade conferem, a esse material, grande potencialidade para emprego como matéria-prima em diversos segmentos industriais.

Menezes, Neves e Ferreira (2002) argumentam que os resíduos de mineração têm enorme potencialidade para utilização como matérias-primas cerâmicas. Tam e Tam (2006) apresentam uma revisão bibliográfica de vários resíduos diferentes que são aproveitados com sucesso para preparação de produtos cimentícios.

Considerando a necessidade de diminuir os impactos ambientais relacionados à sua atividade e de reduzir os custos com a manutenção das suas barragens de resíduos, empresas de mineração estão buscando parcerias com universidades e centros de pesquisa para o estudo da possibilidade de agregar valor aos seus resíduos. Sendo assim, a utilização do resíduo arenoso gerado no beneficiamento do itabirito tem sido estudada para a aplicação em diversos segmentos industriais. Sua utilização para preparação de tijolos solo-cimento e outros produtos para construção civil está sendo estudada pelo grupo de Geotecnia Experimental Aplicada da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Concomitantemente, parte do grupo de pesquisa do setor de Ciência e Tecnologia de Materiais do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) estuda a utilização

dos resíduos arenoso e argiloso em várias linhas: pedra composta, materiais compósitos entre o resíduo arenoso e matéria plástica, pigmentos e produtos cimentícios.

A proposta deste trabalho é estudar a possibilidade de aproveitamento do resíduo arenoso como agregado miúdo para preparação de artefatos de argamassas de cimento Portland. Sua utilização em substituição à areia de construção tem como principal empecilho a sua fina granulometria. A não utilização de agregados graúdos nessa pesquisa foi uma simplificação adotada visando a isolar e minimizar as variáveis a serem analisadas durante o projeto maior para estudo de concretos fabricados com agregado miúdo de resíduo arenoso, do qual este trabalho constitui uma fase inicial.

O aproveitamento do resíduo arenoso proposto neste trabalho vai de encontro à visão de ecoeficiência e de sustentabilidade, que tanto se busca no momento atual. Optamos por discutir ao longo do texto apenas a questão de viabilidade técnica, mas ao fim do trabalho surge a dúvida: devemos mesmo tratar o resíduo arenoso como um resíduo? Mostramos aqui que ele pode ser um subproduto. Fica, então, lançado um tema para se refletir...

2. Objetivos

2.1 Objetivo geral

Utilizar o resíduo arenoso, gerado no beneficiamento do itabirito, para obtenção de produtos cimentícios em substituição aos agregados miúdos naturais.

2.2 Objetivos específicos

– Caracterizar o resíduo arenoso gerado no beneficiamento do itabirito por flotação visando ao seu aproveitamento como agregado miúdo para preparação de argamassas de cimento Portland.

– Estudar os efeitos do tipo de cimento, traço e relação a/c sobre as propriedades da argamassa por meio de planejamentos fatoriais.

– Caracterizar a microestrutura das argamassas preparadas.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Beneficiamento do itabirito

O itabirito é uma rocha proveniente da ação metamórfica sobre depósitos marinhos ricos em ferro e sílica. Faz parte de uma formação ferrífera com ocorrência em diferentes bacias proterozóicas em vários continentes (ROSIÈRE, CHEMALE JR. e GUIMARÃES, 1993). É conhecida como formação ferrífera bandada (BIF – *Banded Iron Formation*) e recebe o nome de itabirito apenas no Brasil. O termo itabirito foi utilizado pela primeira vez como referência às formações ferríferas brasileiras nos trabalhos de Eschwede a respeito do Quadro Geognóstico do Brasil em 1922 (RENGER, 2005). O itabirito é caracterizado pela alternância de camadas de espessura centimétrica ou milimétrica, constituídas por quartzo (bandas claras) e óxidos de ferro (bandas escuras). Dentre os óxidos de ferro, predomina a hematita – Fe_2O_3 para o itabirito comum, podendo também haver magnetita – Fe_3O_4 (ROSIÈRE, CHEMALE JR. e GUIMARÃES, 1993).

O itabirito ocorre em grandes extensões no Brasil e é comumente explorado como minério de ferro. As maiores jazidas brasileiras estão localizadas em Carajás (Pará), no Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) e em Urucum (Mato Grosso do Sul), havendo ainda jazidas menores nos estados do Amapá, Bahia, São Paulo e Paraná (ARAÚJO, 2005).

A região do Quadrilátero Ferrífero constitui uma área de 7.000km^2 no Estado de Minas Gerais, limitada pelos municípios de Belo Horizonte, Santa Bárbara, Mariana e Congonhas do Campo (ARAÚJO, 2005). Essa região possui importantes depósitos de minério de ferro itabirítico e hematítico de alto teor (superior a 60%) que vêm sendo explorados. Os minérios de alto teor são compostos principalmente por hematita, sendo utilizados em alto-fornos na forma de minério granulado, necessitando apenas de operações de britagem e moagem no beneficiamento mineral. Já os itabiritos comuns necessitam de etapas mais complexas para separar o mineral ferroso do mineral de canga.

Uma das alternativas empregada na região do Quadrilátero Ferrífero é separar a hematita do quartzo por flotação. O emprego dessa técnica requer britagem, moagem, deslamagem, flotação convencional (mecânica), remoagem, flotação em coluna e transporte da polpa de concentrado obtido até o local onde ocorre filtração da polpa, pelotamento e queima das pelotas (COSTA *et al.*, 2001). Na Figura 3-1 é representado um fluxograma esquematizando as etapas desse processamento mineral.

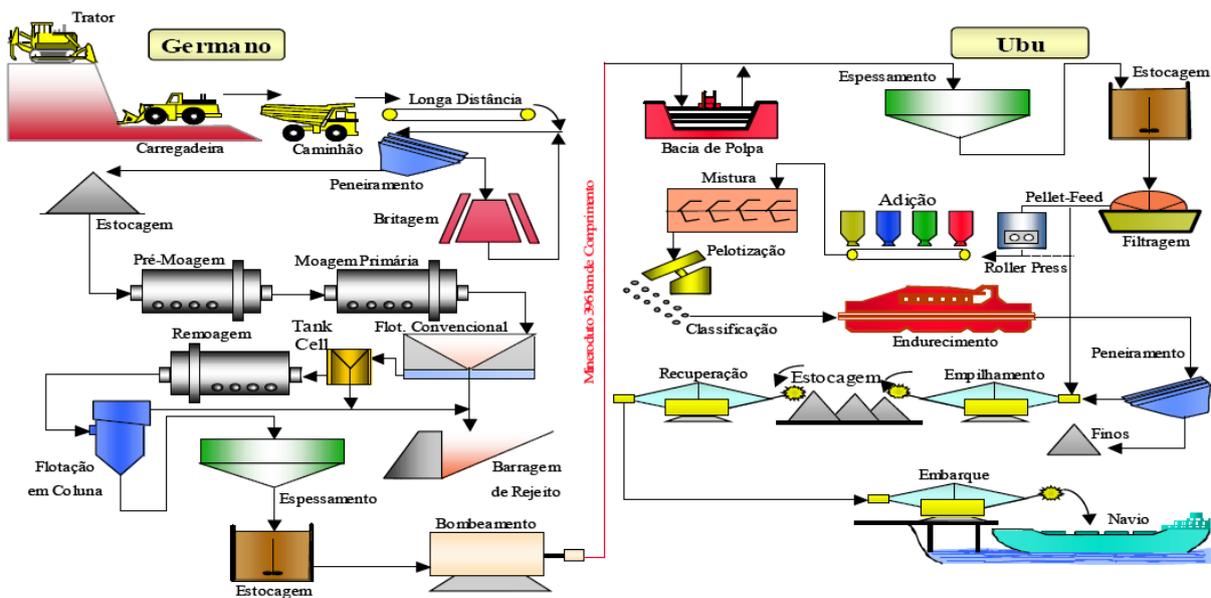


Figura 3-1 – Fluxograma das etapas envolvidas no processamento mineral do itabirito empregado pela Samarco Mineração (MAPA, 2006, p. 31)

No decorrer desse processamento mineral, são gerados dois resíduos principais que são depositados em barragem de resíduos ou utilizados para preenchimento de cavas de mineração. Na etapa de deslamagem (processo que antecede a flotação e não está representado na Figura 3-1) é gerado o resíduo argiloso, com o aspecto de lama, que apresenta difícil secagem e granulometria muito fina. Já nas etapas de flotação, é gerado um resíduo que apresenta aspecto arenoso, granulometria em torno de 0,150 mm (100 Mesh), constituído por 80 a 90% de sílica, 10 a 15% de óxidos de ferro e menos de 3% de silicatos remanescentes. Em média, 35% da massa do minério beneficiado corresponde a esses resíduos, sendo que 1/3 corresponde ao resíduo argiloso e os demais 2/3 correspondem ao resíduo arenoso (SAMPAIO, LUZ e LINS, 2001). Com base na produção anual referente à 2010 informada em seu site, a Samarco, que explora o itabirito em Mariana-MG e promove o beneficiamento por flotação, gera diariamente cerca de 30 mil toneladas de resíduos, sendo aproximadamente 10 mil toneladas de resíduo argiloso e 20 mil toneladas de resíduo arenoso. Além da geração diária, por mais de 30 anos de operação da empresa, foram depositados cerca de 70 milhões de toneladas desses resíduos na Barragem Germano. Na Figura 3-2 é apresentada uma imagem que mostra a deposição de resíduos empregado pela Samarco. No alto da foto é possível ver o emprego dos resíduos na reconstituição de uma cava desativada e, ao centro, vê-se a Barragem Germano, no município de Mariana-MG. Situação similar existe em outras instalações semelhantes na região do Quadrilátero Ferrífero.

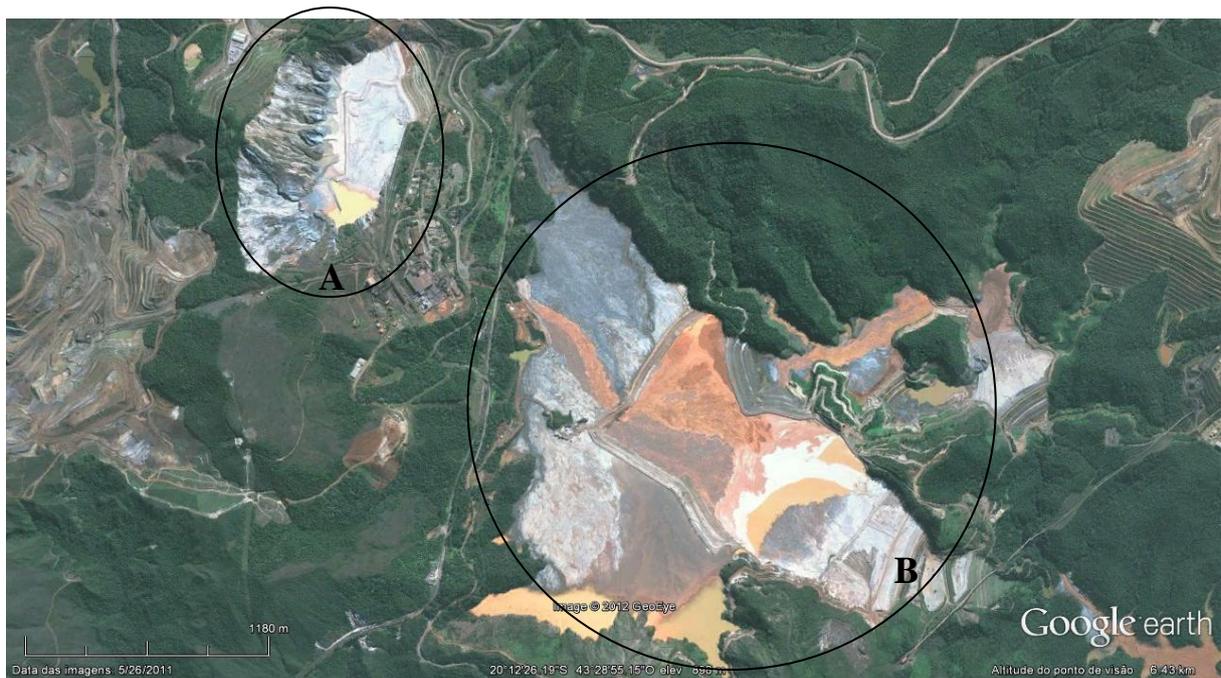


Figura 3-2 – Vista da Barragem Germano de resíduos em Mariana, MG
A – Cava do Germano sendo reconstituída; B – Barragem de resíduos do Germano.
Fonte: Google Earth, registrado em 25/05/2011 (acesso em 06/02/2012)

Pires *et al.* (2003) constataram que esses resíduos são inertes (classe III conforme ABNT NBR 10004 (2004)) e têm capacidade de retenção de metais pesados, provavelmente devido à presença de goethita. Portanto, em princípio, esses resíduos causariam pequeno impacto ambiental. Entretanto, a geração de grandes volumes os torna resíduos de difícil destinação. A disposição em barragens requer altos investimentos para a construção e manutenção. Além disso, o impacto ambiental da atividade mineradora é potencializado porque requer a imobilização de grandes áreas próximas à jazida para deposição dos resíduos.

Silva *et al.* (2006) revelam que esses resíduos apresentam alta limitação para revegetação de áreas mineradas, principalmente devido aos baixos teores de macro e micronutrientes, alta densidade e baixa retenção de água.

3.2 Argamassa de cimento Portland

A ASTM (2005) define argamassa como “uma mistura de material cimentício hidráulico finamente dividido, agregado miúdo e água”.

As argamassas de cimento são utilizadas em alvenarias de alicerces pela resistência exigida e, especialmente, pela condição favorável de endurecimento. São também utilizadas para chapisco devido à sua resistência em curto prazo, nos revestimentos onde é requerida alta impermeabilidade, tais como no interior de reservatórios de água e outras obras hidráulicas, ou em pisos cimentados, onde se exige resistência mecânica e ao desgaste.

3.2.1 Componentes principais

– Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer e consiste essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como produto de adição.

Para a produção do cimento Portland são misturados argila e calcário em proporções adequadas. Essa mistura é triturada e aquecida a cerca de 1450°C. Nesse processo, primeiro ocorre liberação de água e dióxido de carbono, seguida de outras reações entre os sólidos, inclusive fusão parcial da mistura. Assim, nódulos de clínquer são formados e este é misturado a uma pequena porção de gesso e finamente triturado para produzir o cimento. O clínquer produzido nesse processo é constituído por quatro fases predominantes: alita, belita, aluminato de cálcio e ferroaluminato de cálcio (MACLAREN e WHITE, 2003).

A alita constitui de 50 a 70% do clínquer de cimento Portland (TAYLOR, 1997). Trata-se de um silicato tricálcico (Ca_3SiO_5 ou C_3S)¹ com composição e estrutura cristalina modificada pela incorporação de íons Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , K^+ , Na^+ e S^{2-} . A alta energia e reatividade da estrutura são atribuídas aos grandes vazios estruturais causados pelo arranjo irregular dos íons oxigênio em torno dos íons cálcio (METHA e MONTEIRO, 1994). Reage rapidamente com a água e sua hidratação é a que mais contribui para a resistência nos 28 dias iniciais de cura (TAYLOR, 1997).

A belita constitui de 15 a 30% do clínquer de cimento Portland (TAYLOR, 1997). Trata-se de um beta-silicato dicálcico ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ ou $\beta\text{-C}_2\text{S}$) com pequenas quantidades de íons Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , K^+ , Na^+ e S^{2-} . Apresenta estrutura irregular, mas os vazios intersticiais formados são muito menores que os da alita e isto torna a belita muito menos reativa que a alita (METHA e MONTEIRO, 1994). Reage vagarosamente com a água e, portanto, contribui pouco para a resistência inicial (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 1999), mas contribui substancialmente para o aumento de resistência em idades mais avançadas (TAYLOR, 1997).

Os aluminatos de cálcio constituem de 15 a 30% do clínquer de cimento Portland (TAYLOR, 1997). O principal aluminato do clínquer é o aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou C_3A) que ocorre substancialmente modificado em composição e, às vezes, em estrutura pela incorporação de íons tais como Si^{4+} , Fe^{3+} , Na^+ e K^+ (METHA e MONTEIRO, 1994) (TAYLOR, 1997). Reage rapidamente com a água e pode causar pega localizada

¹ É conveniente empregar a nomenclatura simplificada comumente usada em química do cimento: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; S = SO₃; H = H₂O; M = MgO

demasiadamente rápida, a menos que um retardador de pega (gesso) seja adicionado (TAYLOR, 1997).

As fases ferrita constituem de 5 a 15% do clínquer de cimento Portland. Ocorre predominantemente na forma de ferroaluminato tetracálcico ou celita ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ ou C_4AF), substancialmente modificado por diferentes proporções Al/Fe e incorporação de outros íons tais como Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e Si^{4+} (TAYLOR, 1997) (METHA e MONTEIRO, 1994).

Além dos compostos principais relacionados, existem compostos secundários como MgO , TiO_2 , MnO_2 , K_2O e Na_2O . Destes, os óxidos de sódio e potássio (álcalis) apresentam interesse particular porque reagem com alguns agregados e provocam a degradação do concreto. Também se constatou que eles influem na velocidade de aumento de resistência do concreto (NEVILLE, 1997).

As reações de hidratação das fases presentes e as reações entre as fases iniciam-se rapidamente quando a água é adicionada ao cimento. Em geral, a hidratação nos primeiros dias de cura ocorre na seguinte ordem: $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$ (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 1999, p. 15). O gesso e outras fases de sulfato de cálcio presentes são praticamente consumidos por completo nas primeiras 24 horas de reação. A alita e as fases de aluminatos reagem mais rapidamente que a belita e os ferroaluminatos (TAYLOR, 1997). Inicialmente forma-se o gel de silicato de cálcio hidratado (gel C-S-H) e cristais de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH), provenientes principalmente da reação da alita com a água. Formam-se ainda cristais de etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Quando todo o gesso é consumido, o monossulfoaluminato de cálcio hidratado é formado como produto da reação entre a etringita e a alita residual. Com o prosseguimento da reação, mais material anidro é convertido a hidratos (VAN DAMME e GMIRA, 2006).

A hidratação completa de um cimento Portland tradicional tem como produtos principais gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H gel), portlandita (CH), sulfoaluminatos tricálcicos como a etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), aluminatos de cálcio (C_3AH_6) e aluminatos de magnésio (M_4AH_{10}) (TAYLOR, 1997).

As reações de hidratação permitem que o cimento sofra pega (enrijecimento) e endurecimento (aumento de resistência à compressão), além de promover a adesão entre as partículas dos agregados adicionados.

Uma vez que a reatividade dos compostos com a água varia consideravelmente, existem cimentos específicos com características mais adequadas para cada aplicação, variando-se a proporção das fases desenvolvidas na produção do clínquer e sua granulometria. Na Tabela 3-1 são apresentados os principais tipos de cimento empregados no Brasil e suas aplicações.

Tabela 3-1 – Principais tipos de cimento utilizados no Brasil

Sigla	Denominação	Aplicações
CP I	Portland comum	Utilizado quando não são requeridas propriedades especiais. Adequado para o uso em construções de concreto em geral quando não há exposição a sulfatos do solo ou de águas subterrâneas.
CP II-E	Portland composto com escória	Recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos.
CP II-Z	Portland composto com pozolana	Empregado em obras civis em geral para produção de argamassas, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.
CP II-F	Portland composto com filler	Para aplicações gerais.
CP III	Portland de alto forno	Para aplicações gerais, mas é vantajoso em obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.
CP IV	Portland Pozolânico	Para obras em geral. Especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos.
CP V-ARI	Portland de alta resistência inicial	Para uso quando se deseja alta resistência inicial. É recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte, como fábricas de blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, elementos arquitetônicos pré-moldados e pré-fabricados.

Adaptado de (METHA e MONTEIRO, 1994)

O cimento Portland comum (CPI) é produzido usando apenas adição de gesso, que é usado como retardador de pega. Também é oferecido ao mercado o Cimento Portland Comum com Adições CP I-S, com 5% de material pozolânico em massa, recomendado para construções em geral.

O Cimento Portland Composto (CPII) é modificado. Gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum. Seu uso, portanto, é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também

apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.

O cimento Portland de alto-forno (CPIII) apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação, alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, e resistência a sulfatos.

O concreto feito com o cimento Portland pozolânico (CPIV) se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum em idades avançadas. Apresenta características particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação.

Geralmente a alta resistência inicial do cimento Portland CP V – ARI deve-se à utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer e, principalmente, à moagem mais fina do cimento, que conduz a uma área específica maior, pois um grande aumento do teor de alita e aluminatos para acelerar o endurecimento acarretaria em grande aumento do calor de hidratação (METHA e MONTEIRO, 1994).

– **Água de amassamento**

Água de amassamento é a água necessária para a hidratação dos compostos do cimento e para a trabalhabilidade do concreto. A relação entre a quantidade de água e de cimento (relação a/c), geralmente expressa em termos de massa, é tradicionalmente considerada o parâmetro mais importante na previsão das propriedades mecânicas dos concretos e argamassas (NEVILLE, 1997). Féret, em 1892, descreveu que a presença de espaços preenchidos com água ou ar em argamassas apresenta uma influência negativa sobre a resistência à compressão (NEVILLE e AÏTCIN, 2006). Duff Abrams determinou no início do século XX que a resistência é inversamente proporcional à relação a/c de acordo com a equação:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{A/C}} \quad (\text{Equação 3-1})$$

no qual A/C representa a relação entre as quantidades de água e cimento da mistura em unidades de volume e K_1 e K_2 são constantes empíricas. Utilizando esta lei estabelecida por Abrams é possível esboçar uma curva que representa a dependência entre a relação a/c e a resistência conforme a Figura 3-3 apresentada por Neville (1997).

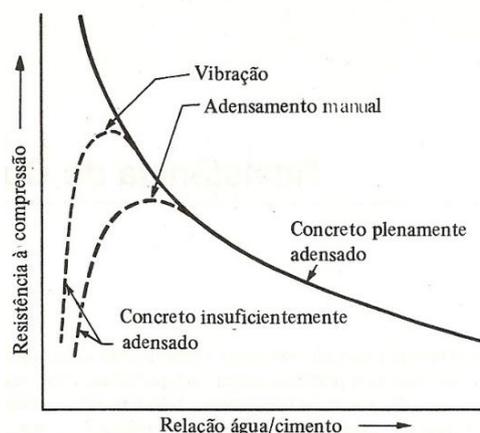


Figura 3-3 – Dependência entre a resistência e a relação a/c
 Fonte: (NEVILLE, 1997, p. 278)

Observa-se pela análise da curva apresentada na Figura 3-3 que maiores resistências são obtidas para menores relações a/c. Entretanto, a curva deixa de ser seguida quando o adensamento² pleno não é mais possível. Como a lei de Abrams deve ser ajustada para cada tipo de agregado utilizado (DE SCHUTTER e POPPE, 2004), torna-se necessário determinar qual a relação a/c ideal para utilização de cada tipo de agregado.

Outras propriedades físicas do concreto, como seu módulo de elasticidade, resistência ao fogo e durabilidade também estão diretamente relacionadas à quantidade de água presente. De acordo com MacLaren e White (2003), a água contida nos produtos cimentícios se encontra principalmente em três formas:

- Água quimicamente ligada: água de hidratação quimicamente ligada aos materiais cimentícios precursores na forma de hidratos. Compreende mais que 90% da água do sistema e não é perdida por secagem, apenas é liberada quando os produtos hidratados são decompostos por aquecimento;
- Água fisicamente ligada: água adsorvida sobre a superfície dos capilares. Esta forma de água se encontra principalmente nos pequenos poros do gel C-S-H;
- Água livre: água em grandes poros que é livre para fluir e sair do sistema. A quantidade de água livre depende da estrutura e do volume dos poros, da umidade relativa e da presença de água em contato direto com a superfície do concreto.

Conforme Metha e Monteiro (1994) e Neville (1997), a relação inversa entre a resistência e a relação a/c é atribuída à porosidade causada pelo excesso de água (água não consumida nas reações de hidratação do cimento) na pasta.

² Adensamento – Compactação da massa de concreto para eliminar o ar aprisionado.

Gilkey apud Neville (1997, p. 278) afirma que a resistência de um concreto preparado com cimento e agregados aceitáveis, numa mistura trabalhável e adequadamente adensado depende da relação a/c, da relação entre o cimento e o agregado, das características do agregado (textura superficial, forma, resistência e rigidez das partículas) e do tamanho máximo do agregado.

– Agregados

Entende-se por agregado o material granular que não reage quimicamente com a água e apresenta dimensões e propriedades adequadas para o uso em concretos e argamassas (NEVILLE, 1997). Os agregados constituem cerca de $\frac{3}{4}$ do volume do concreto, portanto, suas características e qualidade podem influenciar diretamente as propriedades do concreto. São compostos importantes, com grande influência sobre os custos dos produtos cimentícios, devido ao seu baixo custo e à sua alta proporção na massa (NEVILLE, 1997). São usados não só pela redução de custos, mas também pela melhoria de propriedades que confere ao concreto, tais como maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade, se comparado à pasta de cimento pura.

Os agregados são classificados, conforme a dimensão das partículas, em agregado graúdo e agregado miúdo. De acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2009), os agregados graúdos são agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e os agregados miúdos são agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos em relação à distribuição granulométrica.

A aderência dos agregados à massa de pasta de cimento (cimento+água) ocorre devido ao poder de adesão dos compostos formados durante a hidratação do cimento. Para que a adição dos agregados não resulte em fragilização do produto cimentício devido à falta de aderência entre agregado e pasta de cimento, é necessário que a composição da mistura seja acertada de forma que toda a superfície do agregado possa ser recoberta por compostos cimentícios, estabelecendo ligação entre o agregado e a matriz (METHA e MONTEIRO, 1994).

A natureza petrográfica e as características externas de forma e textura do agregado são propriedades importantes que têm grande influência sobre as propriedades reológicas e mecânicas das argamassas e dos concretos. A avaliação petrográfica envolve a identificação das fases mineralógicas presentes no agregado e permite identificar compostos indesejáveis e potencialmente deletérios às propriedades do concreto, tais como torrões de argila, mica livre,

gipsita, pirita e outros materiais álcali-reativos (NEVILLE, 1997) (JOHN, POOLE e SIMS, 1998). A avaliação da forma da partícula de agregado é importante, porque a forma pode influenciar as características de mistura da massa, afetar a adesão entre o agregado e a pasta de cimento e afetar o intertravamento das partículas de agregado na matriz, que são efeitos críticos sobre as propriedades mecânicas do concreto (JOHN, POOLE e SIMS, 1998). A avaliação da textura é importante, porque esta propriedade tem influência sobre a aderência entre o agregado e a pasta de cimento e também sobre a demanda de água da mistura, especialmente no caso dos agregados miúdos (NEVILLE, 1997). Jennigns (1988) comenta que agregados angulares com superfícies ásperas proporcionam melhor entrosamento com a pasta de cimento que agregados lisos e arredondados.

A forma do agregado miúdo deve ser determinada conforme recomendações da NBR 7389-1 (2009) e é tipicamente descrita usando os parâmetros grau de arredondamento e grau de esfericidade. Na Figura 3-4 estão representadas partículas com diferentes formas.

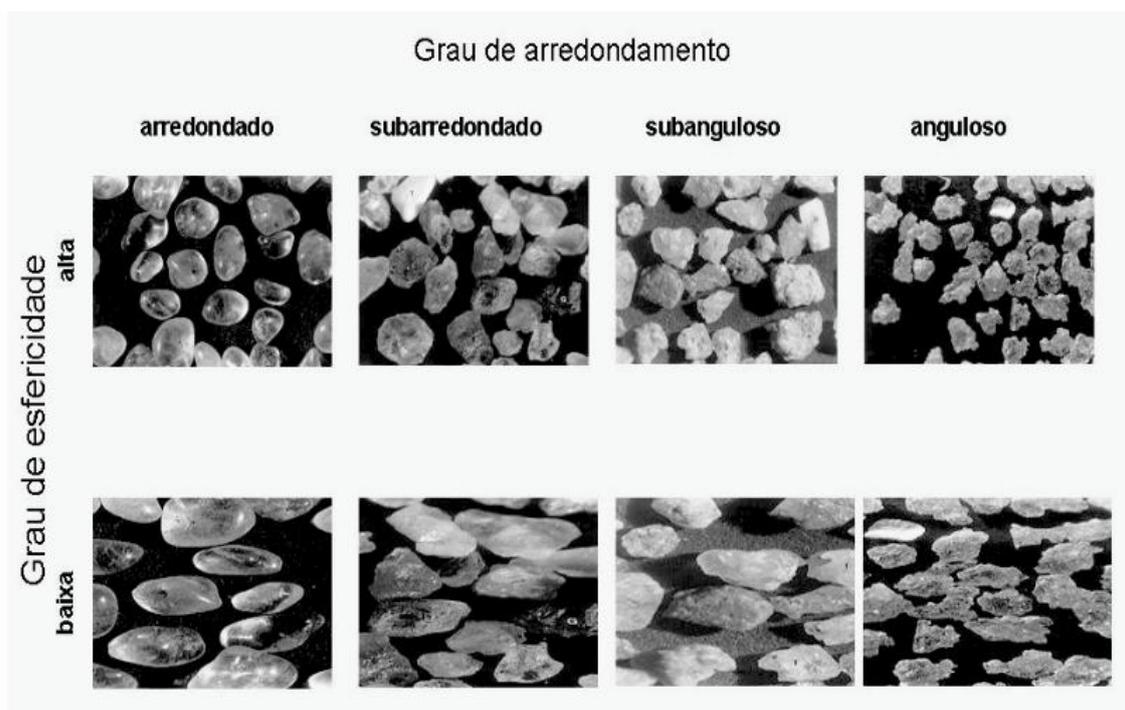


Figura 3-4 – Esquema ilustrativo para orientar a avaliação da forma dos grãos de agregado
Fonte: (NBR 7389-1, 2009)

O grau de arredondamento ou curvatura representa quão agudas são as arestas das partículas de agregado. O arredondamento é um parâmetro que depende muito da resistência à abrasão da rocha-mãe e das ações de desgaste às quais a partícula foi submetida. No caso de agregados britados, a forma das partículas depende também do tipo de britador empregado. A esfericidade é definida como uma função da relação entre a área superficial da partícula e seu

volume. Partículas com elevada relação entre área superficial e volume despertam interesse particular porque aumentam a demanda de água para uma dada trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1997).

Neville (1997) afirma que a forma das partículas de agregado miúdo certamente influencia as propriedades da mistura, sendo que partículas angulosas e/ou alongadas exigem mais água para uma mesma trabalhabilidade. Gonçalves *et al.* (2007) revela que para altas relações a/c, a consistência da argamassa independe das características de forma do agregado miúdo. Entretanto, para maiores frações de sólido na mistura, tem-se evidente influência da forma das partículas finas sobre a consistência.

A classificação da textura superficial é baseada no quanto a superfície das partículas se apresentam lisas ou ásperas. Possivelmente uma textura mais áspera resulta em maiores forças de aderência entre a matriz e as partículas de cimento (METHA e MONTEIRO, 1994) (NEVILLE, 1997). Do mesmo modo, uma área superficial maior significa que pode se desenvolver uma maior aderência (NEVILLE, 1997). Isso ocorre porque a aderência entre a superfície do agregado e a pasta de cimento é atribuída ao intertravamento do agregado na pasta de cimento devido à superfície áspera do agregado e é influenciada por outras propriedades físicas e químicas do agregado relacionadas com a sua composição química e mineralógica, bem como com a condição eletrostática da superfície (NEVILLE, 1997). Entretanto, partículas de textura áspera, alongadas e angulosas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto (METHA e MONTEIRO, 1994).

Agregados miúdos obtidos por britagem e/ou moagem geralmente apresentam forma mais angular e textura superficial mais áspera que agregados miúdos naturais, que geralmente têm forma arredondada com textura superficial lisa. Outra particularidade dos agregados miúdos provenientes de moagem é que eles contêm grande quantidade de material fino (granulometria menor que 75 μm) e, conseqüentemente, grande área superficial. Devido a essas diferenças, concretos e argamassas produzidos com agregados britados/triturados geralmente apresentam maior demanda de água e menor trabalhabilidade que o produzido com agregados naturais (WESTERHOLM *et al.*, 2008). Esse fato se explica pela maior área superficial de agregados angulares e maior atrito de superfícies ásperas durante a mistura. Westerholm *et al.* (2008) observaram em seus experimentos que argamassas preparadas com agregados miúdos provenientes de moagem apresentam viscosidade mais alta que argamassas de referência preparadas com agregados naturais. Esse efeito foi atribuído à grande quantidade de material fino e à forma mais irregular dos agregados provenientes de moagem.

Segundo Bonavetti e Irassar (1994), resultados de ensaios experimentais demonstraram que a demanda por água cresce com a proporção dos finos dos agregados miúdos obtidos por britagem, em consequência do aumento da área de superfície a ser umedecida, acarretando uma redução na trabalhabilidade.

Gonçalves *et al.* (2007) estudaram os efeitos do tipo de moagem do agregado miúdo sobre as propriedades mecânicas e reológicas da argamassa. Em seus experimentos, Gonçalves *et al.* (2007) observaram que a remoção dos materiais finos promove significativa redução da resistência à compressão da argamassa e atribuíram esse efeito à redução da capacidade de compactação da mistura. Westerholm *et al.* (2008) apresentam resultados que confirmam essa observação e afirmam que, de modo geral, quantidades moderadas de material fino têm efeito positivo sobre a consistência e a trabalhabilidade do concreto, além de permitir melhor adensamento.

Segundo Neville (1997), a resistência de um concreto plenamente adensado, com uma mesma relação a/c, é independente da granulometria do agregado, portanto, a granulometria é importante até o ponto em que tem influência sobre a trabalhabilidade. Sendo assim, a granulometria do agregado tem importante influência sobre:

- a quantidade de água necessária para envolver completamente a superfície dos sólidos devido às maiores áreas superficiais de agregados mais finos;
- o volume relativo ocupado pelo agregado;
- a trabalhabilidade da mistura;
- a tendência à segregação.

Controlados estes efeitos, é possível obter argamassas e concretos com as características adequadas a cada aplicação utilizando agregados de qualquer granulometria desde que o agregado não possua outras características (que não seja a granulometria) deletérias.

A maior parte das impurezas deletérias que podem ocorrer em agregados geralmente não estão presentes em agregados britados e/ou submetidos à moagem. No entanto, alguns agregados beneficiados, como os resíduos de mineração, podem conter substâncias nocivas (NEVILLE, 1997). Na Tabela 3-2 são apresentados alguns constituintes potencialmente deletérios e os possíveis efeitos que podem causar em concretos.

Tabela 3-2 - Alguns constituintes potencialmente deletérios encontrados em agregados

Constituintes potencialmente deletérios	Possível efeito adverso no concreto ¹				
	i	ii	iii	iv	v
Partículas de agregado revestidas com argila	-	X	-	-	-
Torrões de argila e partículas de rocha alteradas	-	-	X	X	XX
Partículas microporosas que absorvam água	-	-	X	X	XX
Carvão e partículas leves	-	-	-	-	XX
Partículas fracas ou de baixa dureza revestidas	-	XX	X	X	XX
Matéria orgânica	XX	-	X	-	-
Mica	-	-	XX	-	X
Cloretos ²	X	-	-	X	-
Sulfatos	X	-	-	XX	X
Pirita	-	-	-	XX	XX
Chumbo, zinco ou cádmio solúveis	XX	-	-	-	-
Constituintes álcali-reativos	-	X	-	XX	-
Álcalis quimicamente disponíveis	-	-	-	XX	-

¹ i – interferência química com o tempo de pega do cimento

ii – prevenção física de uma boa adesão entre o agregado e a pasta de cimento

iii – modificação das propriedades do concreto fresco e, conseqüentemente, possível comprometimento da durabilidade e da resistência do material endurecido

iv – interação entre a pasta de cimento e os constituintes do agregado após endurecimento, às vezes causando expansão e trincas no concreto

v – enfraquecimento e baixa durabilidade das partículas de agregado

² O principal problema dos cloretos em concreto está associado à corrosão da estrutura de aço

XX → efeito principal

X → efeito secundário

Fonte: (JOHN, POOLE e SIMS, 1998, p. 124)

– Aditivos

Segundo a NBR 11768 (2011), aditivos são produtos que, quando adicionados em pequena quantidade, modificam algumas das propriedades do concreto no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições. Há, disponíveis no mercado, aditivos para diversas finalidades. Quando se utiliza agregados miúdos com alto teor de finos é recomendado o emprego de um aditivo redutor de água.

A finalidade de um redutor de água é a redução da relação a/c mantendo a trabalhabilidade desejada ou, como alternativa, aumentar a trabalhabilidade com uma mesma

relação a/c. Os concretos com redutores de água geralmente apresentam baixa segregação e boa fluidez.

Os componentes ativos principais dos aditivos redutores de água são tensoativos que são adsorvidos na superfície das partículas de cimento conferindo-lhes carga negativa. Surge então uma repulsão entre as partículas de cimento que causa desaglomeração e conseqüente aumento da área superficial, que favorece o contato com a água e o desenvolvimento das reações de hidratação (NEVILLE, 1997).

A partir da década de 90 foram desenvolvidos os superplastificantes, também chamados aditivos redutores de água de ampla faixa (METHA e MONTEIRO, 1994). São capazes de reduzir a demanda de água em até quatro vezes mais que um aditivo redutor de água comum. Consistem de surfactantes aniônicos de alta massa molecular com grande número de grupos polares ao longo da cadeia de hidrocarboneto (METHA e MONTEIRO, 1994).

Quando um superplastificante é utilizado como redutor de água, a diminuição da relação água/cimento leva a uma melhoria das propriedades mecânicas e durabilidade do concreto, uma vez que a porosidade total sofre um decréscimo. Pode-se esperar que, reduzindo em 25 a 35 % o conteúdo de água, ocorra um aumento de 50 a 75 % na resistência à compressão para a idade de 1 dia (HEWLETT e RIXOM, 1977).

A fissuração e fluência de concretos com superplastificantes são comparáveis à de concretos de referência (RAMACHANDRAN e MALHOTRA, 1995). Os resultados obtidos por diversos pesquisadores (MALHOTRA, 1989) (MALHOTRA e MALANKA, 1981) demonstram que, para uma mesma relação água/cimento, a colocação do superplastificante não implica em alterações na retração, permeabilidade, resistência à agressão química, resistência mecânica e módulo de deformação. Alguns trabalhos apontam para uma melhoria das propriedades mecânicas para igual relação água/cimento, principalmente nas primeiras idades, justificada pelo fato do aditivo superplastificante promover um aumento da área de contato efetiva da água e das partículas de cimento, conseguida graças à dispersão destas partículas e eliminação da sua aglutinação. Esta melhoria, entretanto, pode ser minimizada nos casos em que o aditivo incorpore ar, como comprovado pelos estudos de Gonçalves *et al.* (1990).

A falta de consenso do meio técnico com relação à influência dos superplastificantes nas propriedades do concreto endurecido justifica-se, entre outras razões, pela diversidade de materiais (aditivo, cimento, adições minerais e outros), dosagens e metodologias utilizadas na realização dos experimentos.

3.2.2 Microestrutura da argamassa de cimento Portland

O concreto de cimento Portland é um material poroso, com estrutura heterogênea e complexa. Sua microestrutura é descrita como um sistema integrado constituído por (i) pasta de cimento hidratado, (ii) agregado graúdo e miúdo e (iii) interface entre agregado e pasta de cimento, que é conhecida como zona de transição interfacial.

Segundo Metha e Monteiro (1994) e Ramachandran e Beaudoin (1999, p. 42) a zona de transição tem espessura entre 10 e 50 μm , apresenta porosidade e permeabilidade mais altas que o restante da pasta, sendo ocupada por cristais bem desenvolvidos e orientados de portlandita (CH) e, em alguns casos, gel de silicato de cálcio hidratado (gel C-S-H) e etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). A maior porosidade da zona de transição é atribuída à elevação da relação água/cimento na mistura em decorrência do filme de água que se forma em torno do agregado (METHA e MONTEIRO, 1994). Os maiores espaços permitem a formação de grandes cristais de portlandita com seu eixo C orientado perpendicularmente ao agregado, o que cria planos preferenciais de ruptura. A falha na aderência entre a pasta de cimento e o agregado pode ser relacionada aos grandes cristais formados, com superfície específica menor, o que diminui a força de adesão. De acordo com Ramachandran e Beaudoin (1999, p. 42), os efeitos da zona de transição são particularmente significantes em pastas ou concretos feitos com relação a/c maior que 0,40.

A fase C-S-H é a fase majoritária presente no cimento Portland hidratado. Os produtos iniciais da hidratação consistem de folhas ou flocos de C-S-H, podendo estar revestidas ou com membranas gelatinosas de sulfoaluminato tricálcico. Após alguns dias de cura observam-se fibras e placas de C-S-H, podendo haver estruturas reticulares, varas e tubos de etringita. Em avançados estágios de hidratação, uma compacta estrutura de grãos achatados de C-S-H e algumas placas de sulfoaluminato monocálcico. Diamond apud Ramachandran e Beaudoin (1999, p. 19) propôs a classificação da morfologia das partículas de gel C-S-H em quatro tipos, descrita por:

- Tipo I – partículas de forma alongada ou fibrosa que ocorrem nas idades iniciais. São descritas como de forma prismática, acicular, de bastonete, de folha enrolada ou por outras descrições. Apresentam alguns micrômetros de comprimento.
- Tipo II – partículas com estrutura reticular ou em forma semelhante à uma colmeia (*honeycombed structure*), ocorrendo em conjunto com estruturas do tipo I.
- Tipo III – microestrutura irregular constituída por partículas achatadas com menos de 100nm na maior dimensão.

- Tipo IV – um produto de hidratação avançada que se apresenta como uma fase bastante compacta, com aparência de covas.

As propriedades da pasta de cimento são determinadas por sua natureza química e sua microestrutura. As características microestruturais dependem de muitos fatores, como a composição química e física do cimento, tipo e quantidade de material adicionado, temperatura e período de hidratação e a relação a/c inicial. O estudo da fase sólida inclui a análise da morfologia (forma e tamanho), recobrimento superficial, área superficial e densidade. Análises da porosidade, forma dos poros e distribuição dos tamanhos de poros são necessários para investigação da fase não sólida. Várias propriedades são interdependentes e uma única propriedade pode não ser suficiente para explicar adequadamente as características físico-mecânicas da pasta de cimento.

Um estudo de morfologia da pasta de cimento requer a observação da forma e tamanho das partículas individuais. Existem muitas tentativas de explicar a resistência da pasta por exame da morfologia, entretanto, diversas exceções são encontradas.

A comparação de resultados micromorfológicos de diferentes trabalhos tem limitação inerente devido ao pequeno número de micrografias usualmente publicado e à pequena área correspondente a essas micrografias, com possibilidade de não serem representativas da estrutura. Especulações sobre a origem da resistência e outras propriedades, quando baseadas nessas observações têm validade limitada, especialmente porque diversas propriedades da pasta de cimento são influenciadas em um nível estrutural muito menor do que pode ser observado por um microscópio eletrônico de varredura tradicional (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 1999).

4. Parte Experimental

4.1 Planejamento experimental

O trabalho experimental foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu na caracterização do resíduo arenoso quanto à sua composição química, mineralógica e propriedades físicas que tem influência direta sobre as propriedades da argamassa. A segunda etapa consistiu na preparação de argamassas de cimento Portland de diferentes composições e na sua caracterização.

As propriedades das argamassas produzidas com o resíduo arenoso determinadas para caracterizá-la foram:

- densidade e viscosidade da pasta;
- tempo de pega;
- resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura;
- densidade aos 7, 28 e 91 dias de cura;
- absorção de água aos 28 e 91 dias de cura;
- índice de vazios aos 28 e 91 dias de cura e
- massa específica aos 28 e 91 dias de cura.

A influência do resíduo arenoso sobre essas propriedades foi avaliada por meio de um planejamento fatorial. Esse tipo de planejamento apresenta a vantagem de proporcionar uma análise mais confiável dos resultados, pois permite avaliar a interação entre as variáveis de entrada do estudo e estimar o quão importantes são seus efeitos (MONTGOMERY, 1997) (NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2001).

No planejamento dos experimentos foram tomados três fatores em dois níveis cada. Portanto, foi necessária a preparação de argamassas com oito formulações diferentes. Os fatores analisados foram o tipo de cimento nos níveis CPII e CPV, relação água/cimento nos níveis 0,75 e 0,80 e traço nos níveis 1:2 e 1:2,5. Esses fatores foram escolhidos por serem os de maior influência sobre as propriedades e o custo de produção das argamassas de cimento Portland.

Optou-se por trabalhar com os cimentos CPII e CPV porque são produtos tradicionalmente empregados no mercado brasileiro, são fáceis de encontrar e apresentam propriedades favoráveis para preparação de corpos premoldados. A escolha de trabalhar com alta relação a/c ocorreu porque testes preliminares indicaram alta demanda de água para obtenção de massas trabalháveis.

A composição das argamassas preparadas foi definida de maneira a maximizar o emprego do resíduo arenoso e minimizar o consumo de água. Neste trabalho optou-se por estudar os traços 1:2 e 1:2,5 porque o preparo de argamassas de traços muito diferentes é inviabilizada pela dificuldade em se obter massas de boa trabalhabilidade com as mesmas relações a/c. Na Tabela 4-1 são apresentadas as variáveis e os níveis em estudo.

Tabela 4-1 – Fatores e níveis considerados na etapa de planejamento dos experimentos

Fatores	Níveis	
Tipo de cimento	CPII E32	CPV ARI
Relação água/cimento	0,75	0,80
Traço	1:2	1:2,5

A maior fonte de erros associada à medida da resistência à compressão de argamassa é a dificuldade de se controlar o tamanho dos poros e a homogeneidade das peças durante a moldagem. O artifício empregado para diminuir o erro associado ao procedimento de moldagem é a realização dos ensaios de resistência à compressão em pelo menos cinco replicatas. Já os ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica e densidade foram executados em três replicatas, uma a mais que o recomendado na norma ABNT NBR 9778 (2005).

Segundo Neto, Scarminio e Bruns (2001), os ensaios devem ser realizados em ordem completamente aleatória para evitar a ocorrência de distorção estatística nos resultados, isto é, para impedir que erros atípicos sejam obrigatoriamente associados a determinadas combinações de níveis. Sendo assim, foi aplicada ordem aleatória para definir a ordem de preparo das argamassas. Entretanto, os experimentos executados neste trabalho impõem limitação em relação ao tempo. É desejável que todas as argamassas sejam preparadas no mesmo dia para que possam ser submetidas a exatamente às mesmas condições de cura e para que suas propriedades possam ser medidas no mesmo dia em ordem aleatória. Entretanto, apenas duas composições puderam ser preparadas em cada dia de trabalho. Então, nos ensaios de caracterização dos corpos de prova com tempo de cura definido, apenas as replicatas das duas argamassas que foram preparadas na mesma data puderam ser analisadas em ordem aleatória entre elas. Isso é importante para evitar que fatores externos como, por exemplo, oscilações de tensão da rede elétrica exerçam influência sobre os resultados de apenas uma composição e sejam interpretados como efeitos reais ao invés de interpretá-los como erros aleatórios. A execução da parte experimental seguiu a sequência de etapas apresentada na Figura 4-1.

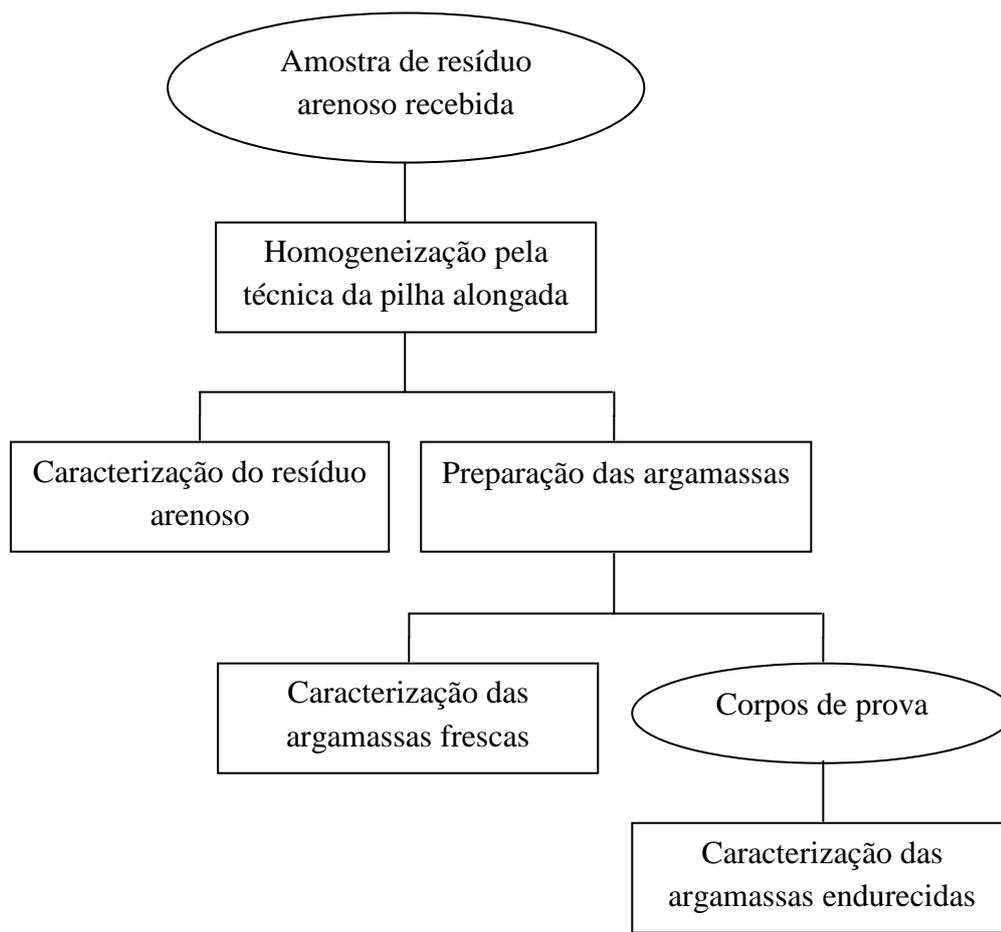


Figura 4-1 – Fluxograma representando a sequência de experimentos executados para este trabalho

4.2 Caracterização do resíduo arenoso

– Homogeneização

A coleta das amostras de resíduo arenoso foi executada pela empresa Samarco Mineração SA, sendo que a amostra fornecida é representativa do resíduo gerado na planta de flotação convencional.

As amostras foram recebidas já secas, acondicionadas em sacos com aproximadamente 40 kg de material em cada um. Cerca de 150 kg dessa amostra de resíduo arenoso foi homogeneizada no Laboratório de Preparação de Amostras Minerais do CDTN e reservada para a realização deste trabalho. Metade do material foi utilizada em sua caracterização e na preparação de corpos de prova, enquanto que a outra metade foi armazenada como testemunho.

O método de homogeneização adotado foi o da pilha alongada, indicado para a homogeneização de grandes volumes de material com características de material arenoso e granular. Seguindo essa técnica, foi feita uma pilha alongada de aproximadamente oito metros

de comprimento sobre uma superfície limpa e seca, coberta por uma lona plástica. Em cada extremidade da lona foram vertidos dois pacotes de amostra. Esse material foi continuamente vertido ao longo da linha que une as duas pilhas em movimentos de vai e vem utilizando uma pá, resultando em uma pilha de seção transversal triangular. Após formada essa pilha alongada, suas extremidades foram retomadas e distribuídas sobre a mesma. Para garantir completa homogeneidade, o material foi distribuído sobre uma nova pilha alongada e todo o procedimento foi repetido. Por fim, a pilha alongada foi cortada em três frações e esse material foi armazenado em três frascos contendo aproximadamente 50kg de material cada um. Cada uma dessas frações foi novamente homogeneizada no laboratório de cimentação (LABCIM) pela técnica da pilha alongada e dividida em frações de cerca de 6kg, o que corresponde a aproximadamente à quantidade de amostra utilizada em cada ensaio de preparo de argamassa. Na Figura 4-2 é apresentada uma foto ilustrando o processo de homogeneização descrito.



Figura 4-2 – Foto do processo de homogeneização
Fotos de Carolina B. Freire

– Caracterização química e mineralógica

Uma amostra do resíduo arenoso foi enviada para SGS GEOSOL Laboratórios Ltda para análise e classificação conforme a norma da ABNT de Classificação de resíduos sólidos NBR 10004 (2004).

A composição mineralógica do resíduo arenoso foi determinada por difração de raios X, aplicando o método do pó. A técnica possibilitou determinar as fases minerais presentes na amostra e a quantificação aproximada das fases constituintes. Foi utilizado um difratômetro de raios X, marca Rigaku, modelo Geigerflex, tubo de raios X com anodo de cobre e banco de dados JCPDS 1998 disponibilizados pelo Laboratório de Difração de Raios X do CDTN. A

identificação das fases mineralógicas foi obtida por comparação com o banco de dados da ICDD – *International Center for Diffraction Data*.

A presença de impurezas orgânicas foi analisada por espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) utilizando aparelho ABB Bomem, modelo MB 102 e resolução de 4 cm^{-1} .

– **Caracterização granulométrica e de forma**

A composição granulométrica foi determinada no Laboratório de Preparo de Amostras Minerais do CDTN. O procedimento seguido para a determinação granulométrica foi o descrito na NBR NM 248 (2003). Entretanto, como o material apresenta granulometria inferior a $420\mu\text{m}$, foi utilizado conjunto de peneiras diferente do recomendado nessa norma. Na separação das frações foram utilizadas peneiras da série Tyler, com as seguintes aberturas: $420\mu\text{m}$, $297\mu\text{m}$, $210\mu\text{m}$, $177\mu\text{m}$, $149\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$, $71\mu\text{m}$, $53\mu\text{m}$, $44\mu\text{m}$ e $37\mu\text{m}$. Nesse procedimento, a amostra foi classificada a seco em peneirador automático da marca Retsch, modelo AS 200, configurado para trabalhar com amplitude de 1 mm, durante o período de 20 minutos.

Para análise da forma das partículas, foi feita análise petrográfica conforme recomendado na NBR 7389-1 (2009).

4.3 Argamassa

4.3.1 Materiais componentes

Para preparação da argamassa foram utilizados cimento, água, fluidificante e resíduo arenoso fornecido pela empresa Samarco Mineração em substituição ao agregado miúdo.

– **Cimento**

Foram utilizados dois tipos de cimento comercial:

- cimento CII E32 Holcim, lote 2SCK80, fabricado em 17/07/2009, comumente encontrado no mercado de Belo Horizonte. Sua composição química é apresentada na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 – Análise química do cimento CII E 32 empregado neste estudo

Análise Química* (% em massa)	
SiO ₂	23,98
Al ₂ O ₃	6,98
Fe ₂ O ₃	2,69
CaO	56,32
MgO	2,27
SO ₃	1,34
CO ₂	4,76
K ₂ O	0,65
Resíduo insolúvel	1,77
C ₃ A teórico	4,45

* Dados informados pelo fabricante conforme relatório de ensaios de cimento apresentado no Anexo 1

- cimento Holcim CPV ARI, lote 2SCK80, fabricado em 16/06/2009 comumente utilizado em Belo Horizonte pelas fábricas de produtos pré-moldados para construção civil. Sua composição química é apresentada na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 – Análise química do cimento CII V ARI empregado neste estudo

Análise Química* (% em massa)	
SiO ₂	19,20
Al ₂ O ₃	4,96
Fe ₂ O ₃	3,02
CaO	64,06
MgO	0,70
SO ₃	2,82
CO ₂	2,85
K ₂ O	0,82
Resíduo insolúvel	0,48
C ₃ A teórico	7,75

* Dados informados pelo fabricante conforme relatório de ensaios de cimento apresentado no Anexo 1

– Água

A água utilizada para a preparação dos corpos de prova foi água potável fornecida pela COPASA através da rede de abastecimento.

– Aditivo

Experimentos preliminares comprovaram que é necessário empregar um aditivo redutor de água para substituir o agregado miúdo pelo resíduo em estudo. Foi utilizado para essa finalidade o superplastificante SIKA Viscocrete 20 HE lote 1001000749, um aditivo com elevado poder de redução de água. Sua escolha foi baseada em seu grande emprego para a

preparação de concretos pré-moldados ou que necessitem de desforma rápida. Na Tabela 4-4 são apresentadas as propriedades desse aditivo conforme informações do fabricante.

Tabela 4-4 – Características do aditivo SIKA VISCOCRETE 20 HE

Ação principal	Redutor de água de altíssima eficiência
Base química	Policarboxilato
Densidade a 25°C	1,00 a 1,15g cm ⁻³
Aspecto	Líquido castanho claro
pH	4 a 5

– Agregado miúdo

Em substituição ao agregado miúdo, é estudado neste trabalho o emprego do resíduo arenoso gerado no beneficiamento mineral do itabirito conforme descrito na seção 3.1. Este estudo envolveu a caracterização química, mineralógica e granulométrica desse material para tal aplicação, além da investigação das propriedades de corpos de prova cimentícios preparados com sua utilização.

4.3.2 Composição

Conforme o planejamento fatorial descrito na seção 4.1, foram preparadas argamassas de oito composições diferentes variando o tipo de cimento, o traço e a relação a/c. A quantidade de aditivo redutor de água utilizada em todos os experimentos foi de 0,6% em relação à massa de cimento utilizada, conforme sugestão do fabricante. Na Tabela 4-5 são apresentadas as composições de cada argamassa preparada.

Tabela 4-5 – Composição das argamassas preparadas seguindo planejamento fatorial

Formulação	Tipo de cimento	Traço*	a/c**
1	CPII	1:2	0,75
2	CPII	1:2	0,80
3	CPII	1:2,5	0,75
4	CPII	1:2,5	0,80
5	CPV	1:2	0,75
6	CPV	1:2	0,80
7	CPV	1:2,5	0,75
8	CPV	1:2,5	0,80

* relação entre os volumes de cimento e de resíduo arenoso;

** relação entre as massas de água e de cimento.

4.3.3 Preparação, moldagem e cura da argamassa

Todas as argamassas foram preparadas seguindo rigorosamente o mesmo procedimento. Tentou-se ainda repetir as condições ambientais, embora um controle rígido não esteja

disponível no LABCIM. Conseguiu-se apenas manter a temperatura do laboratório em cerca de 25°C e a umidade foi observada em cada dia de preparo de argamassa para certificar de que estava sempre acima de 50%.

Para o preparo das argamassas, inicialmente o fluidificante foi completamente dissolvido em água e essa mistura foi colocada na cuba da batedeira, marca G.Paniz, modelo BP20C. O misturador foi ligado na velocidade baixa e o cimento foi adicionado. Decorridos três minutos, nos quais o cimento foi mantido em contato com a água sob agitação lenta, o resíduo arenoso foi adicionado gradualmente durante o tempo de um minuto. Imediatamente após essa etapa, a velocidade foi alterada para alta e a mistura foi mantida com essa agitação por mais dois minutos. Passado esse tempo, a batedeira foi desligada.

Em seguida ao amassamento, foi feita moldagem manual de corpos de prova, de acordo com o recomendado na NBR 5738 (2003/Emd1:2008), em moldes de aço padronizados com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura previamente preparados e lubrificados com óleo mineral. A colocação da argamassa na forma foi feita com espátula, em três camadas aproximadamente iguais, recebendo, cada uma delas, doze golpes uniformes para uniformizar a distribuição da massa no molde e eliminar o ar aprisionado. A operação de moldagem de cada corpo de prova foi encerrada pela rasadura do topo com a espátula, que foi deslizada sobre as bordas da forma.

Foram moldados cerca de 30 corpos de prova para cada composição estudada. Nesse procedimento, a argamassa foi revolvida periodicamente para evitar exsudação e manter a homogeneidade da massa durante a moldagem dos corpos de prova.

A cura dos corpos de prova foi feita ao ar com as amostras nos moldes. A umidade do laboratório foi monitorada e constatou-se que ela se manteve acima de 50% ao longo de todo o período de cura.

4.3.4 Caracterização da argamassa

Imediatamente após o amassamento, amostras das argamassas recém preparadas foram coletadas para medida do tempo de pega, viscosidade e densidade da argamassa fresca.

O tempo de pega foi medido em apenas uma replicata em medidor de tempo de pega automático, marca Resistence Machine Unificate, modelo M-23. O equipamento foi programado para fazer uma medida a cada 15 minutos, de forma que o início e o fim de pega foram registrados graficamente.

A viscosidade foi medida em Viscosímetro, marca Bookfield, modelo RVT conforme Rotina Técnica do LABCIM (TELLO, HAUCZ e SELES, 2008).

A medida da densidade da argamassa fresca foi feita em três replicatas. Foram utilizados três moldes de massa e volume previamente determinados. Após o amassamento, os moldes foram preenchidos com a argamassa fresca, tomando os cuidados necessários para eliminar o ar aprisionado, e tiveram sua massa determinada em balança semianalítica digital, marca Gehaka, modelo BG 8000.

A microestrutura da argamassa endurecida foi analisada e foram medidas a densidade, resistência à compressão, capacidade de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

A densidade da argamassa endurecida foi medida em todos os corpos de prova ensaiados quanto à resistência a compressão e à absorção de água. Portanto, a densidade da argamassa endurecida foi medida aos 7, 28 e 91 dias. O ensaio consistiu em medir a massa dos corpos de prova em balança digital semianalítica, marca Gehaka, modelo BG 8000 e o volume dos corpos de prova foram calculados a partir dos dados de altura e diâmetro medidos com paquímetro, modelo Universal, marca Mitutoyo.

A resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias foi medida utilizando prensa EMIC, modelo PCI 150 seguindo procedimento recomendado na NBR 5739 (2007). Cinco corpos de prova de cada composição foram coletados aleatoriamente no dia de cada ensaio. Foram desmoldados e submetidos a desgaste por abrasão para proporcionar uma superfície lisa e livre de ondulações. Em seguida foi feito o capeamento com mistura de enxofre e pó de quartzo fundida. Para evitar a ocorrência de distorção estatística nos resultados, os corpos de prova foram preparados para o ensaio e analisados em ordem aleatória.

A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica foram medidos aos 28 e 91 dias de cura conforme procedimento descrito na NBR 9778 (2005). Foram ensaiados três corpos de prova de cada composição, os quais foram escolhidos aleatoriamente. Foram desmoldados, submetidos a desgaste por abrasão para proporcionar superfície lisa e tiveram suas dimensões de diâmetro e altura medidas no dia do ensaio.

Para caracterização da microestrutura da argamassa endurecida foram empregadas as técnicas:

- difração de raios X aos 70 dias de cura usando difratômetro de raios x Rigaku, sistema D\MAX ULTIMA automático, com goniômetro θ - θ , varredura $2\theta/\theta$ e tubo de raios X com anodo de Cobre e foco normal. Foi usado o software aplicativo da Materials Data Inc. Jade 9 (Laboratório de Difração de Raios X do CDTN);
- microscopia eletrônica de varredura aos 70 dias de cura usando microscópio JEOL JSM-840A, corrente de 10^{-10} A, tensão 15kV e captura por elétrons secundários (Laboratório de

Microanálises e Microscopia Eletrônica do Consórcio Física-Química-Geologia/UFMG - CDTN);

- microscopia eletrônica de varredura aos 90 dias de cura usando microscópio JEOL JSM-5310 com EDS Termo Scientific Ultradry 6680D (Laboratório de Metalografia e Microscopia Eletrônica de Varredura do CDTN).

5. Resultados e discussão

5.1 Caracterização do resíduo arenoso

O resíduo arenoso, apresentado na Figura 5-1, tem o aspecto de uma areia muito fina, de coloração acinzentada. A manipulação dá a sensação de areia, porém ela deixa uma camada mais escura nas mãos. Quando seco, apresenta alta escoabilidade. A sua homogeneização foi importante para assegurar que cada alíquota utilizada nos ensaios é representativa de todo o material empregado neste estudo.



Figura 5-1 – Resíduo arenoso
Foto de Carolina B. Freire

O laudo de classificação de resíduos sólidos apresentado pela SGS GEOSOL Laboratórios LTDA (Anexo 2) revela que o resíduo arenoso é classificado como Classe II B (Não Perigoso – Inerte), não sendo corrosivo ou reativo. Essas características são importantes para a aplicação desse resíduo na indústria da construção civil; como não se trata de um produto perigoso, ele pode ser manuseado sem oferecer riscos à saúde do trabalhador e da população.

Resultados obtidos por difração de raios X (apresentados na Figura 5-2) revelam que o resíduo arenoso é constituído pelas fases hematita, goethita e quartzo. Na Tabela 5-1, são apresentadas as proporções das fases, estimada com base nas intensidades relativas dos principais picos de difração.

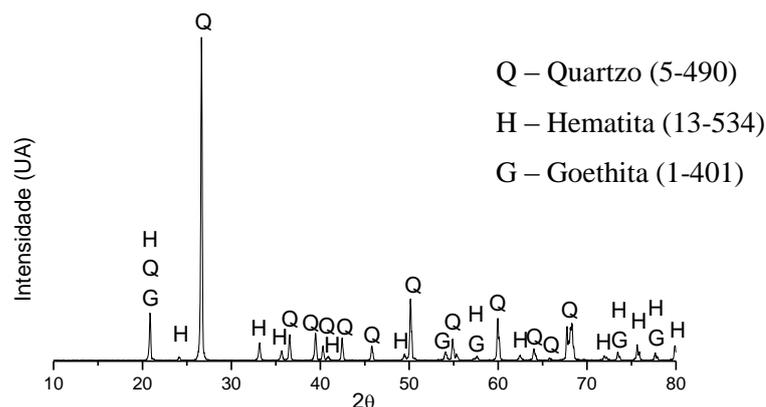


Figura 5-2 – Difratoograma de raios X do resíduo arenoso

Tabela 5-1 – Proporção das fases presentes no resíduo arenoso

Teor relativo das fases			
Fases	Hematita	Goethita	Quartzo
Proporção	Menor proporção	Traço	Predominante

Observa-se que a fase predominante presente no resíduo arenoso é quartzo e, além deste, estão presentes fases de baixa reatividade e que, portanto, não sofrerão reações de hidratação e não causarão interferência nos processos de hidratação do cimento.

O espectro na região do infravermelho da amostra dispersa em brometo de potássio, mostrado na Figura 5-3, revela bandas típicas de ligações Si – O. As bandas de maior intensidade, em 1081 cm^{-1} e 1178 cm^{-1} , são atribuídas ao estiramento assimétrico Si-O-Si. Já as bandas em 779 cm^{-1} , 694 cm^{-1} e 459 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento simétrico Si-O-Si e à deformação angular simétrica (PISCIELA e PELINO, 2005) (HLAVAY, JONAS, *et al.*, 1978). Conforme proposto por Ruan *et al.* (2002), provavelmente a assimetria das bandas em 1081 e 459 cm^{-1} ocorrem devido à sobreposição dessas bandas com bandas de menor intensidade relacionadas a vibrações Fe-O.

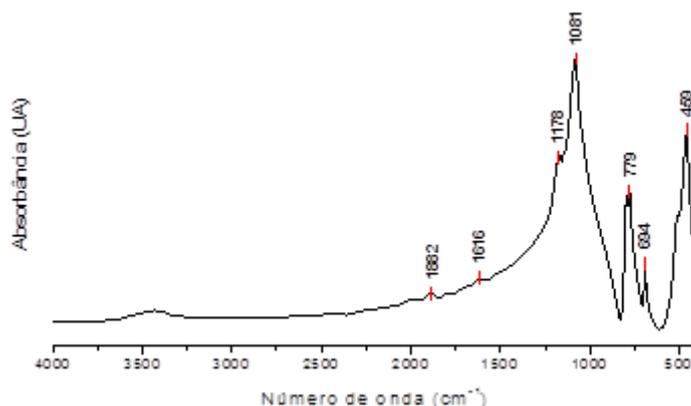


Figura 5-3 – Espectro na região do infravermelho do resíduo arenoso disperso em KBr

Observa-se que não há bandas indicativas de grupos N-H, esperadas caso a amina utilizada no processo de flotação não fosse eliminada com eficiência nos processos de tratamentos do resíduo realizados pela empresa para destinação final. Também não são observadas bandas indicando a presença de outros compostos orgânicos. Então, pode-se afirmar que não há contaminantes orgânicos em quantidade suficiente para causar efeitos deletérios associados ao emprego desse resíduo para a preparação de argamassas com cimento Portland.

Observa-se nos resultados de distribuição granulométrica apresentados na Tabela 5-2, que o resíduo arenoso apresenta granulometria bem mais fina que os agregados miúdos tipicamente utilizados na construção civil.

Tabela 5-2 – Resultados da análise granulométrica do resíduo arenoso

Abertura (mesh)	Abertura (μm)	%massa retida	%acumulado acima	%acumulado abaixo
14	1200	0,0	0,0	100,0
16	1000	0,0	0,0	100,0
20	810	0,0	0,1	99,9
28	590	0,1	0,2	99,8
35	420	0,1	0,3	99,7
48	297	0,4	0,7	99,3
65	210	2,9	3,7	96,3
80	177	4,5	8,1	91,9
100	149	18,5	26,6	73,4
150	105	26,1	52,7	47,3
200	74	24,7	77,4	22,6
270	53	3,5	80,9	19,1
325	44	6,2	87,2	12,8
400	37	5,3	92,5	7,5
Fundo	Fundo	7,5	100,0	0,0

A dimensão máxima característica³ e o módulo de finura⁴, determinados conforme a NM 248 (2003), do resíduo arenoso são 420 μm e 0,40 respectivamente. Na NBR 7211 (2009), agregado miúdo é definido como agregado cujos grãos passam pela peneira de 4,75 mm ressalvados os limites de distribuição granulométrica representados em preto na Figura 5-4. A

³ Dimensão máxima característica: Grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa

⁴ Módulo de finura: é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal (estabelecida na NM 248/2003), dividida por 100.

curva granulométrica do resíduo arenoso, apresentada em azul na Figura 5-4, revela que esse material não se enquadra nos intervalos de distribuição granulométrica utilizável para agregados miúdos estabelecida pela referida norma. Além disso, o resíduo arenoso apresenta módulo de finura menor que a zona utilizável inferior, de 1,55 a 2,20 (NBR 7211:2009). Portanto, o resíduo arenoso não atende às especificações de distribuição granulométrica estabelecidas na NBR 7211 (2009) para ser usado como agregado miúdo. Assim, os estudos de dosagem desenvolvidos neste trabalho são necessários para validar sua aplicabilidade.

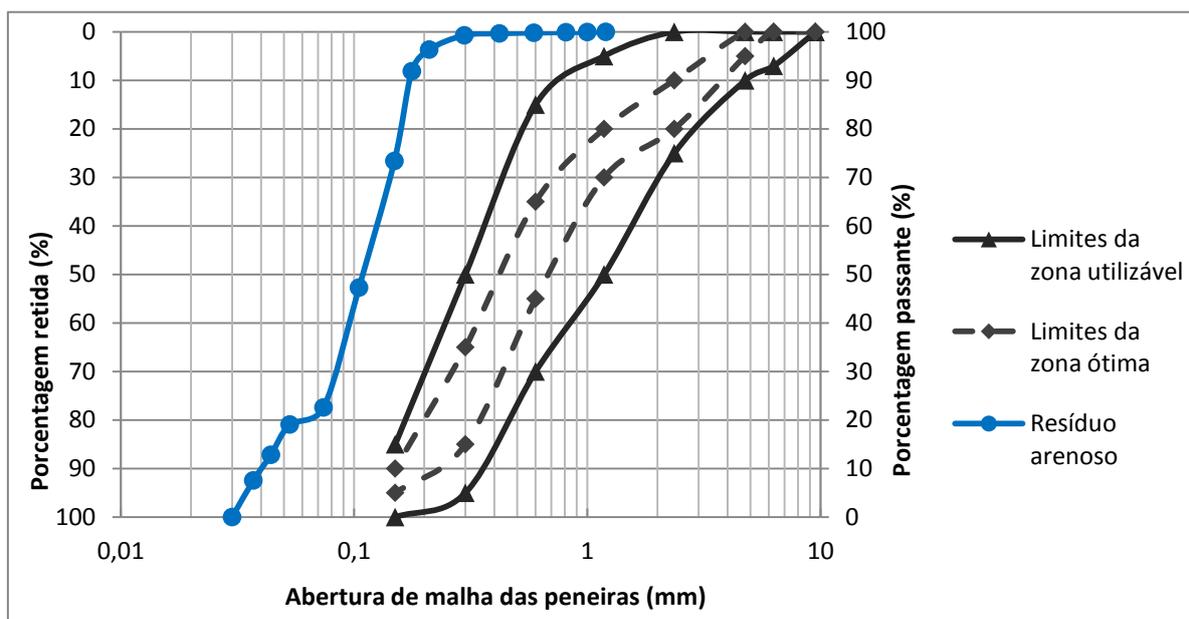


Figura 5-4 – Curva granulométrica do resíduo arenoso com representação das porcentagens em massa retidas em cada peneira e das porcentagens retidas acumuladas

A baixa granulometria do resíduo arenoso impõe dificuldades ao preparo de produtos cimentícios. Isso ocorre porque o material apresenta alta área superficial e, portanto, requer maior quantidade de água para umedecer sua superfície. Sendo assim, para preparar argamassas com boa trabalhabilidade, é necessário trabalhar com alta relação a/c, o que apresenta o inconveniente de aumentar a porosidade da argamassa endurecida e, conseqüentemente, reduz a sua resistência à compressão. Para contornar esse revés, neste trabalho optamos por empregar um aditivo redutor de água.

Imagens do resíduo arenoso com aumento de 50 vezes, apresentadas na Figura 5-5, revelam que as partículas de quartzo apresentam alto grau de esfericidade, grau de arredondamento predominantemente subanguloso e superfície rugosa.

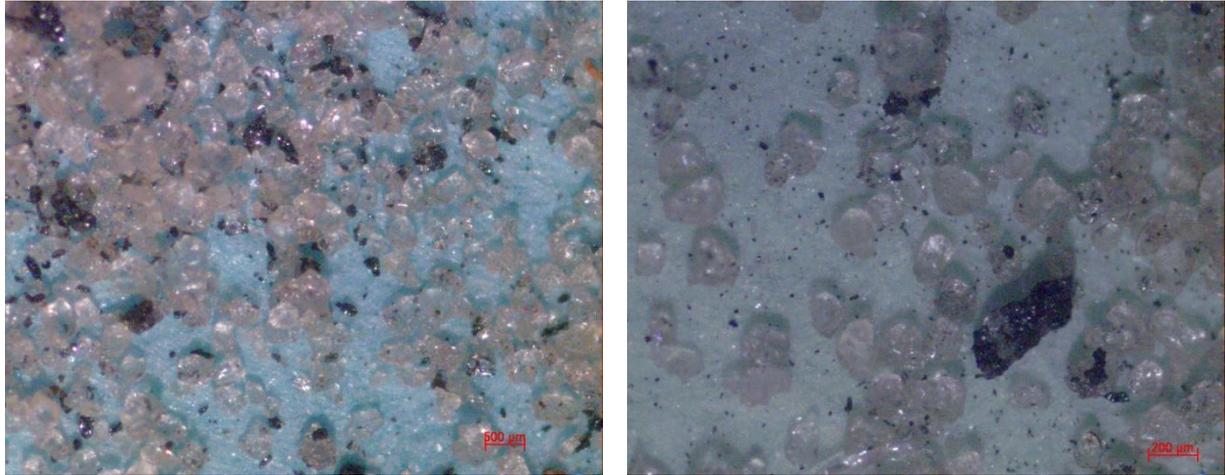


Figura 5-5 – Resíduo arenoso visto por lupa com aumento de 50x

As características de arredondamento e textura do resíduo arenoso apresentam a desvantagem de aumentar o consumo de água e diminuir a trabalhabilidade. Entretanto, apresentam a vantagem de melhorar a resistência do concreto endurecido por aumentar a aderência à pasta.

5.2 Argamassa fresca

A caracterização do resíduo arenoso, apresentada na seção anterior, revela que esse material apresenta características favoráveis a seu emprego como agregado miúdo em artefatos de cimento, tais como alta disponibilidade, alta uniformidade e ausência de materiais deletérios. Entretanto, apresenta como desvantagem sua baixa granulometria, expressa em termos do seu baixo módulo de finura e da sua baixa dimensão máxima característica. A baixa granulometria associada às características de forma do agregado determinam que o resíduo arenoso requer maior quantidade de água para o preparo da argamassa que os agregados tradicionalmente utilizados. Sendo assim, ao aumentar o consumo de água, é necessário empregar também maior quantidade de cimento para obter resistências equivalentes. Portanto, as características físicas do resíduo arenoso determinam que, para obter massas de boa trabalhabilidade e peças de alta resistência à compressão, é necessário trabalhar com altas relações a/c e traço com quantidade limitada de agregado, além de empregar um aditivo redutor de água. Devido a esses fatores, este trabalho limitou-se ao estudo dos traços 1:2 (volume de cimento : volume de resíduo arenoso) e 1:2,5. Como este trabalho se trata de um estudo exploratório, optou-se ainda por não empregar agregado graúdo.

Conforme apresentado na seção 4.3.2, foram preparadas oito composições de argamassa em ordem aleatória, conforme relacionado na Tabela 4-5. Na Tabela 5-3 é reapresentada a relação de composições e a ordem de preparo determinada aleatoriamente.

Tabela 5-3 – Composição das argamassas preparadas

Formulação	Ordem de preparo	Tipo de cimento	Traço*	a/c**
1	5 ^a	CPII	1:2	0,75
2	7 ^a	CPII	1:2	0,80
3	3 ^a	CPII	1:2,5	0,75
4	8 ^a	CPII	1:2,5	0,80
5	1 ^a	CPV	1:2	0,75
6	4 ^a	CPV	1:2	0,80
7	2 ^a	CPV	1:2,5	0,75
8	6 ^a	CPV	1:2,5	0,80

* relação entre os volumes de cimento e de resíduo arenoso;

** relação entre as massas de água e de cimento

As oito composições preparadas apresentaram boa trabalhabilidade e consistência que favoreceram ao processo de moldagem. Na Figura 5-6 são apresentadas fotos das argamassas recém preparadas. Observa-se a formação de água livre sobre a pasta nas composições 1 e 2. Nas demais composições observa-se que a massa apresenta consistência visualmente plástica.

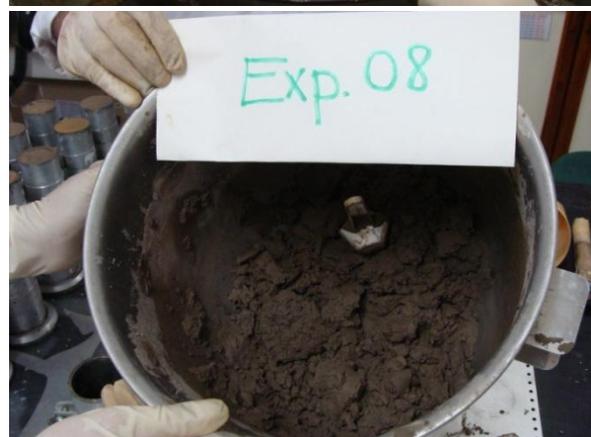
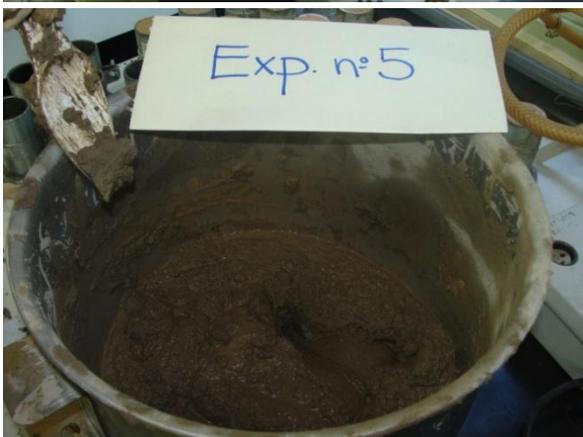
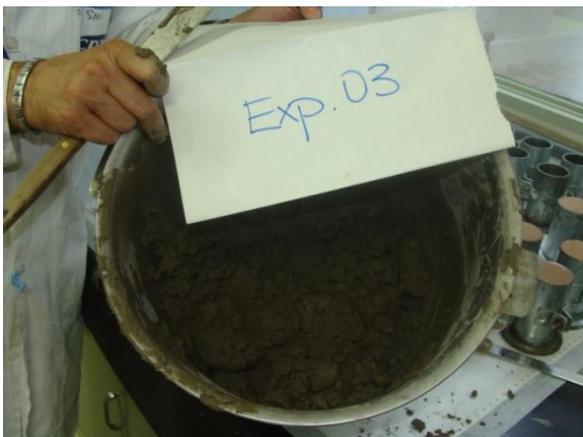


Figura 5-6 – Aspecto das argamassas preparadas
Fotos de Carolina B. Freire

Para a caracterização da argamassa fresca foram medidas as propriedades: tempo de pega, viscosidade e densidade da pasta. Os resultados dessas medidas foram agrupados e são apresentados na Tabela 5-4.

Tabela 5-4 – Propriedades da argamassa fresca

FORMULAÇÃO				PROPRIEDADE					
Formulação	Cimento	Traço	a/c	Tempo de pega (min)*		Densidade da pasta (g.cm ⁻³)**		Viscosidade da pasta (Pa.s)***	
				início	fim	média	S	média	S
1	CPII	1:2	0,75	422	617	1,867	0,025	23,6	4,1
2			0,80	489	819	1,920	0,047	77,9	37,5
3		1:2,5	0,75	384	594	1,870	0,026	170,9	24,6
4			0,80	334	409	1,865	0,021	184,3	55,1
5	CPV	1:2	0,75	234	534	1,823	0,028	39,3	6,0
6			0,80	n.d.	n.d.	1,905	0,028	61,3	23,0
7		1:2,5	0,75	260	410	1,931	0,029	228,0	55,4
8			0,80	277	412	1,918	0,061	144,0	11,2

* Baseado em uma única medida

** Baseado em 3 medidas

***Baseado em 15 medidas da mesma porção de amostra coletada logo após o preparo da pasta
média – média amostral

S – desvio padrão amostral

n.d. – não determinado devido a falha do equipamento durante o ensaio

Medidas do tempo de início e fim de pega revelaram resultados coerentes com as propriedades dos cimentos utilizados. Observa-se, na Figura 5-7, que as argamassas preparadas com cimento CPV apresentam pega mais rápida que aquelas preparadas com cimento CPII. As argamassas preparadas com cimento CPII apresentaram início de pega cerca de 410 minutos após seu preparo e as argamassas preparadas com cimento CPV apresentaram início de pega cerca de 260 minutos após seu preparo. Tendo em vista a possibilidade de emprego dessas argamassas para o preparo de peças pré-moldadas, no qual não é necessário transportar a argamassa preparada por longas distâncias, esses resultados revelam que as argamassas estudadas se adequam bem a esse tipo de aplicação.

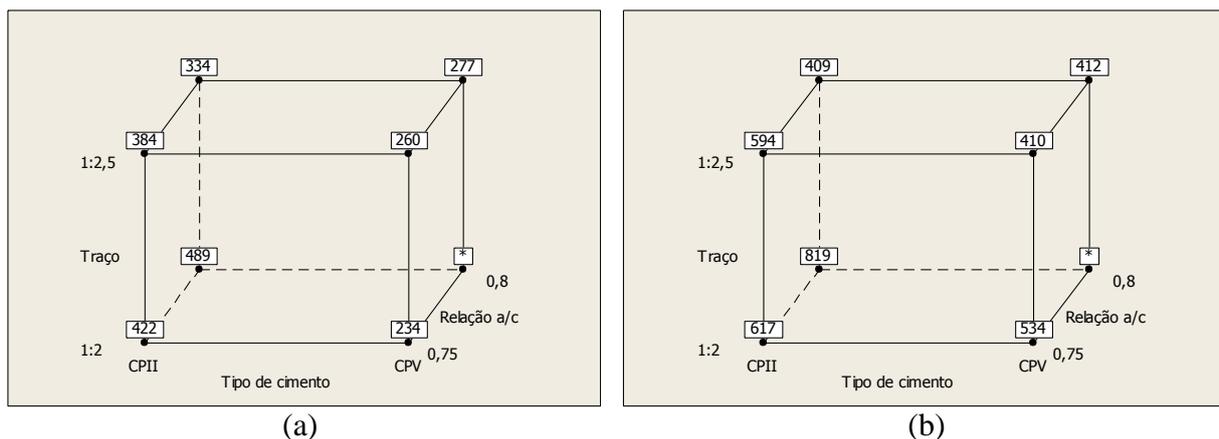


Figura 5-7 – Apresentação geométrica dos resultados de tempo de pega (minutos) (a) início de pega; (b) fim de pega

Os resultados de densidade da pasta, apresentados na Figura 5-8, não permitiram identificar uma variável com efeito significativo sobre esta propriedade. As pastas preparadas apresentaram resultados de densidade no estado fresco condizentes com as argamassas dosadas em central empregadas no Brasil descritas por Martins Neto (1999).

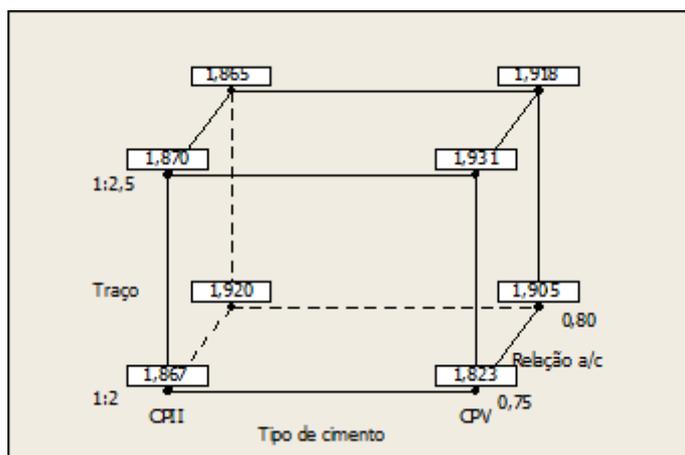


Figura 5-8 – Apresentação geométrica dos resultados de densidade da pasta ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Os resultados das medidas de viscosidade, apresentados geometricamente na Figura 5-9, revelam que há efeito significativo do traço sobre a viscosidade da pasta e que não há efeito significativo dos fatores tipo de cimento e relação a/c sobre esta propriedade nas composições estudadas. A carta de Pareto dos efeitos padronizados, apresentada na Figura 5-10, confirma essa observação. Portanto, o emprego de traço 1:2,5 ao invés do traço 1:2 aumenta consideravelmente a viscosidade da pasta de cimento. Os altos desvios padrão amostrais obtidos nas medidas de viscosidade da pasta ocorrem devido à tendência de ocorrer segregação.

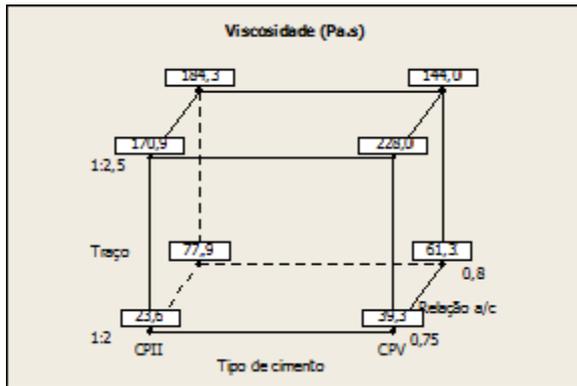


Figura 5-9 – Apresentação geométrica dos resultados de viscosidade

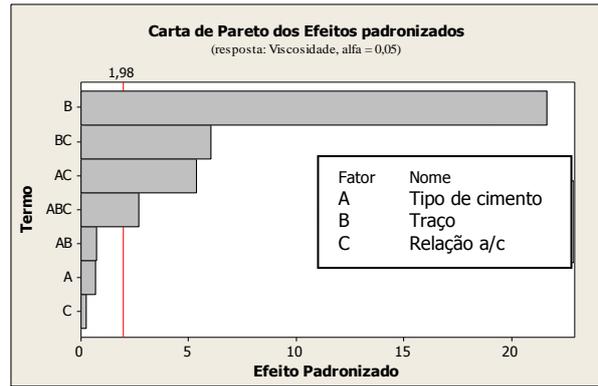


Figura 5-10 – Carta de Pareto dos efeitos padronizados da viscosidade

5.3 Argamassa endurecida

Para a caracterização da argamassa endurecida foram medidas as propriedades: densidade aos 7, 28 e 91 dias de cura; resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura; absorção de água, índice de vazios e massa específica aos 28 e 91 dias de cura. Os resultados dessas medidas foram agrupados e são apresentados nas Tabelas 5-5 e 5-6.

Tabela 5-5 – Propriedades da argamassa endurecida

Formulação	Densidade dos corpos de prova (g.cm ⁻³)						Resistência a compressão (MPa)*			
	7 dias*		28 dias**		91 dias***		7 dias		28 dias	
	m	S	m	S	m	S	m	S	m	S
1	1,990	0,088	1,979	0,054	1,903	0,061	9,10	0,87	12,78	1,34
2	2,069	0,028	2,039	0,045	2,003	0,016	9,63	0,55	13,65	0,61
3	1,933	0,029	1,917	0,042	1,900	0,076	7,55	0,53	11,56	1,45
4	1,972	0,101	1,952	0,040	1,886	0,094	8,57	0,53	13,19	1,03
5	1,935	0,084	1,931	0,044	1,925	0,039	15,30	2,67	15,75	3,26
6	1,974	0,037	2,019	0,057	2,014	0,067	14,08	1,22	18,50	2,69
7	1,939	0,018	1,924	0,037	1,876	0,033	13,30	0,84	14,73	2,65
8	1,974	0,058	1,958	0,059	1,914	0,029	11,51	0,89	14,00	1,79

* Baseado no ensaio de 5 corpos de prova colhidos aleatoriamente

** Baseado no ensaio de 8 corpos de prova colhidos aleatoriamente

*** Baseado no ensaio de 3 corpos de prova colhidos aleatoriamente

m – média amostral

S – desvio padrão amostral

Tabela 5-6 – Propriedades da argamassa endurecida

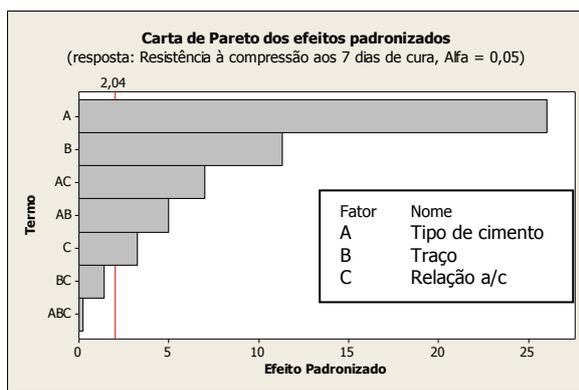
Formulação	Absorção de água (%)*				Índice de vazios (%)*				Massa específica (g/cm³)*			
	28 dias		91 dias		28 dias		91 dias		28 dias		91 dias	
	m	S	m	S	m	S	m	S	M	S	m	S
1	17,86	1,49	20,67	0,60	32,74	1,62	35,54	0,32	2,731	0,025	2,688	0,045
2	16,49	1,28	17,27	0,11	31,23	1,56	32,41	0,13	2,757	0,012	2,777	0,018
3	19,59	1,73	19,22	1,82	34,17	1,70	33,25	1,39	2,656	0,040	2,599	0,096
4	18,15	0,76	18,95	2,42	32,97	0,80	33,66	2,93	2,711	0,022	2,687	0,012
5	17,77	1,26	18,30	0,60	31,51	1,31	32,68	0,75	2,592	0,041	2,653	0,033
6	16,12	2,15	17,08	2,19	29,15	3,37	31,03	2,19	2,559	0,073	2,646	0,061
7	16,01	0,25	18,41	0,67	29,23	0,14	32,54	0,55	2,580	0,027	2,622	0,061
8	13,76	1,07	15,43	0,66	25,26	1,87	27,63	0,87	2,458	0,052	2,475	0,026

* Baseado no ensaio de 3 corpos de prova colhidos aleatoriamente

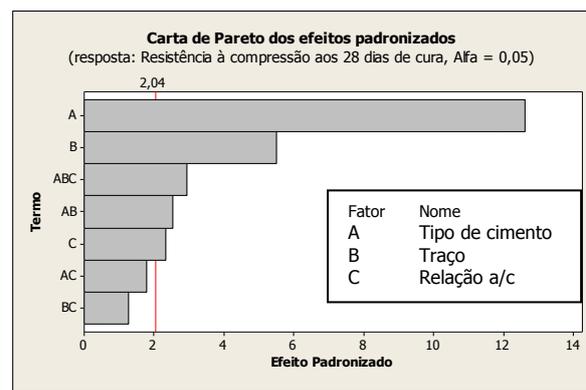
m – média amostral

S – desvio padrão amostral

A análise dos resultados de resistência à compressão pelas cartas de Pareto dos efeitos padronizados, apresentadas na Figura 5-11, ao nível de confiança de 95%, revela que há efeito significativo das três variáveis em estudo sobre a resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de cura. Além dos efeitos principais, é também significativo o efeito da interação entre o tipo de cimento e o traço.



(a)



(b)

Figura 5-11 – Carta de Pareto dos efeitos padronizados da resistência à compressão (a) aos 7 dias de cura; (b) aos 28 dias de cura

Os resultados representados na Figura 5-12 revelam que maiores resistências são alcançadas com a utilização de cimento CPV, traço 1:2 ou relação a/c 0,80. Maiores valores de resistência para o traço 1:2 do que para o traço 1:2,5 já eram esperados, uma vez que, quanto maior a proporção de material aglomerante na massa, mais intensa é a adesão dos

constituintes. Entretanto, os resultados apresentados são importantes para avaliar a magnitude dessa diferença e a possibilidade de empregar maiores proporções de resíduo arenoso sem grande perda de resistência.

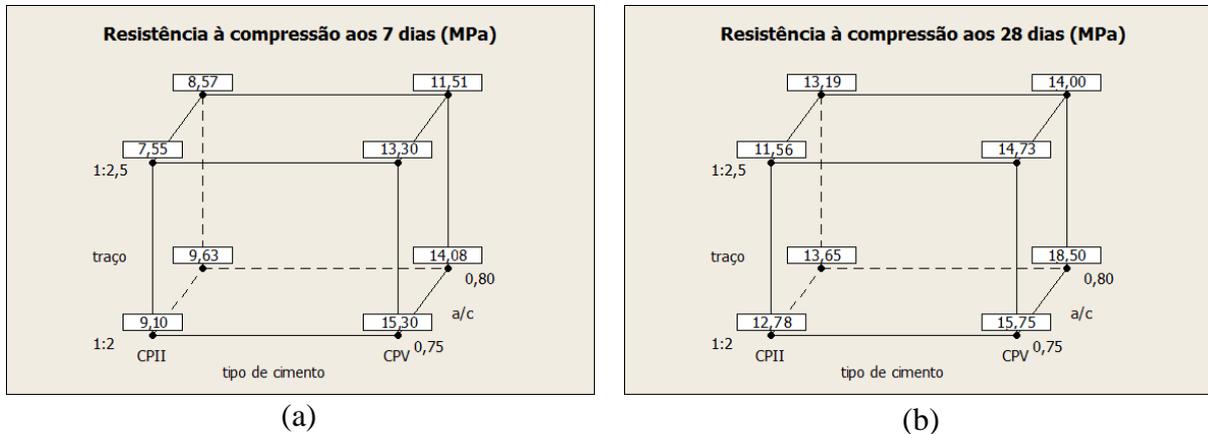


Figura 5-12 – Apresentação geométrica dos resultados de resistência à compressão (a) aos 7 dias de cura; (b) aos 28 dias de cura

Observando os resultados apresentados na Figura 5-13, é possível notar que a densidade dos corpos de prova diminui com o avanço da hidratação do concreto entre os 7 e 91 dias de cura. Esse efeito ocorre devido à perda de água dos corpos de prova durante a cura ao ar.

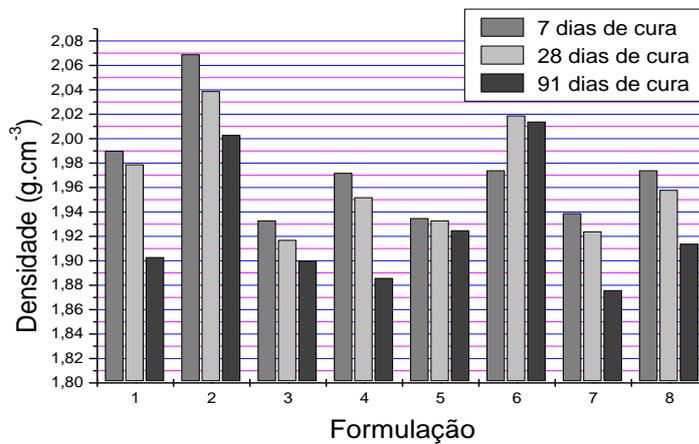
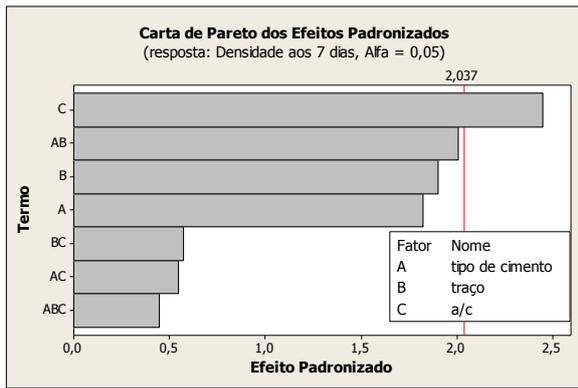
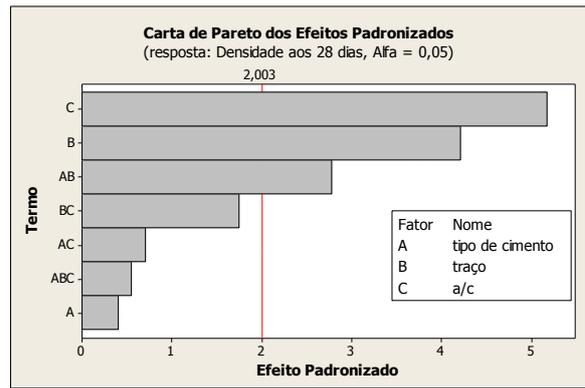


Figura 5-13 – Resultados de densidade dos corpos de prova aos 7, 28 e 91 dias de cura

Ao nível de confiança de 95%, nota-se nas cartas de Pareto dos efeitos padronizados apresentadas na Figura 5-14, que a relação a/c tem efeito significativo sobre a densidade dos corpos de prova aos 7 e 28 dias de cura. Observa-se com clareza na análise dos resultados apresentados geometricamente na Figura 5-15, que os corpos de prova de a/c 0,80 apresentam densidade maior que os corpos de prova com a/c 0,75.

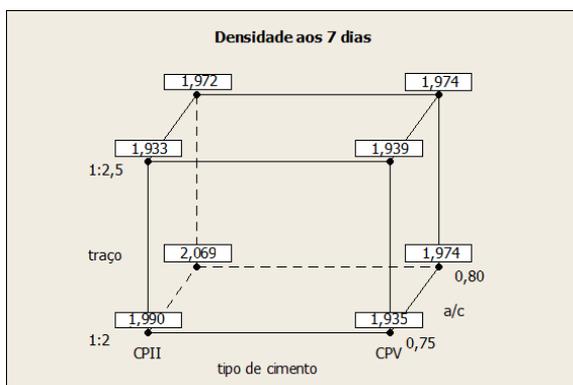


(a)

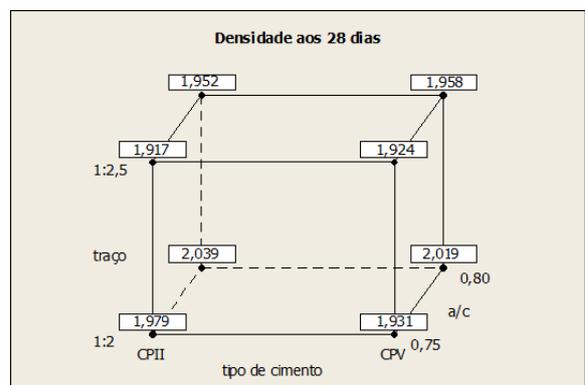


(b)

Figura 5-14 – Cartas de Pareto dos efeitos padronizados da densidade dos corpos de prova (a) após 7 dias de cura; (b) após 28 dias de cura



(a)

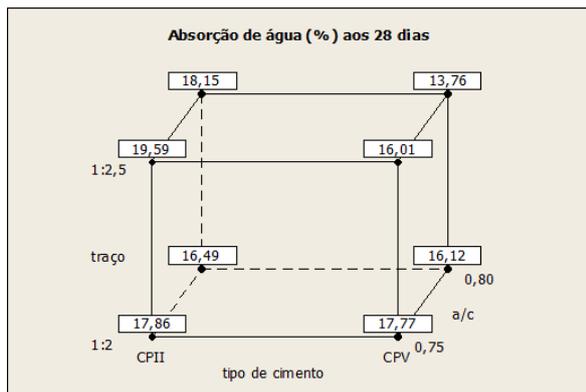


(b)

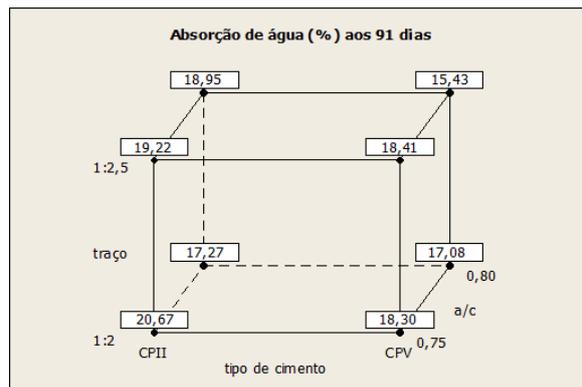
Figura 5-15 – Apresentação geométrica dos resultados de densidade ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) dos corpos de prova (a) após 7 dias de cura; (b) após 28 dias de cura

A absorção de água é uma medida do total de poros permeáveis do corpo de prova, enquanto o índice de vazios é uma medida da porosidade total existente na estrutura. Sendo assim, a absorção de água está diretamente relacionada à durabilidade, uma vez que possibilita o conhecimento da forma pela qual os agentes agressivos penetrarão através do interior do corpo. Já o índice de vazios está relacionado à resistência mecânica do material.

Resultados de absorção de água aos 28 e 91 dias de cura apresentados geometricamente na Figura 5-16 e sua análise por meio das curvas de Pareto dos efeitos padronizados, apresentados na Figura 5-17, revelam que há efeito significativo do tipo de cimento e da relação a/c sobre essa propriedade. Observa-se que argamassas preparadas com cimento CP V ou a/c 0,80 apresentam menor absorção de água, o que está relacionado à menor porosidade aberta dessas argamassas e sugere que essas formulações estão menos susceptíveis a sofrerem degradação por serem menos permeáveis.

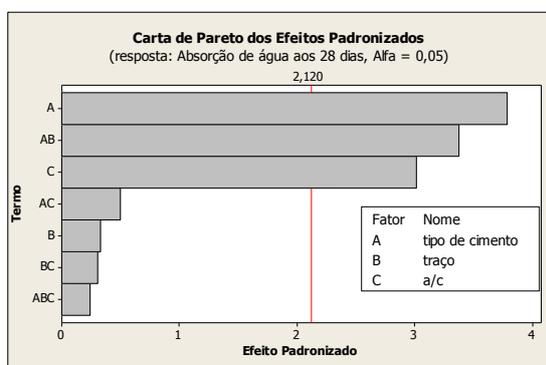


(a)

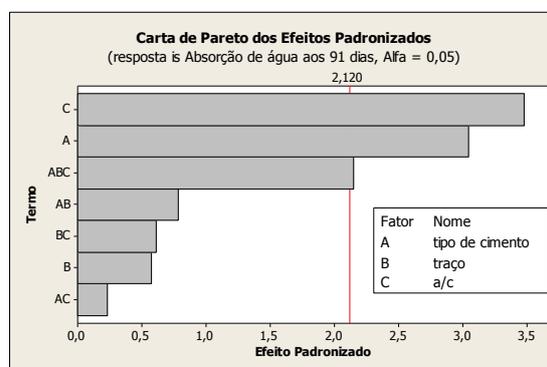


(b)

Figura 5-16 – Apresentação geométrica dos resultados de absorção de água (a) aos 28 dias de cura; (b) aos 91 dias de cura



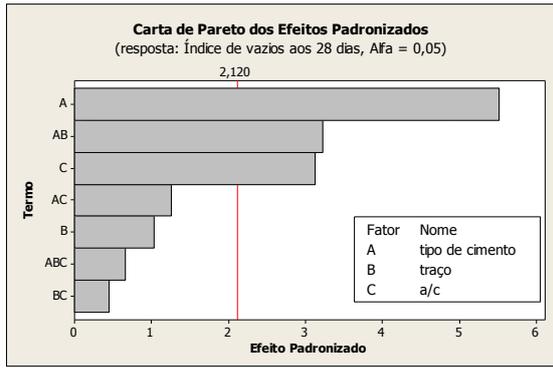
(a)



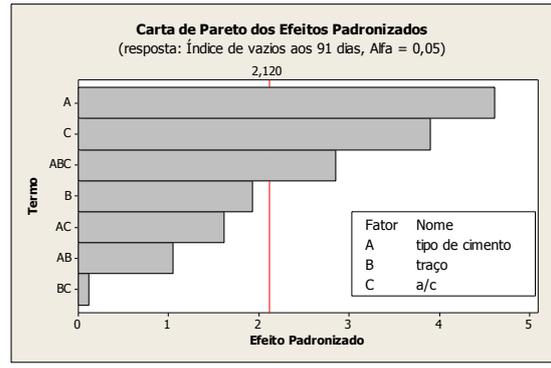
(b)

Figura 5-17 – Carta de Pareto dos efeitos padronizados da absorção de água (a) aos 28 dias de cura; (b) aos 91 dias de cura

Resultados das medidas do índice de vazios dos corpos de prova das oito formulações preparadas revelaram, conforme apresentado na Carta de Pareto dos efeitos padronizados na Figura 5-18, que essa propriedade sofre influência significativa das variáveis tipo de cimento e relação a/c, sendo que o efeito da interação entre essas variáveis não é significativo ao nível de confiança de 95%. Observa-se, nos resultados apresentados na Figura 5-19, que são obtidos corpos com menores índices de vazios empregando-se cimento CP V e relação a/c 0,80.

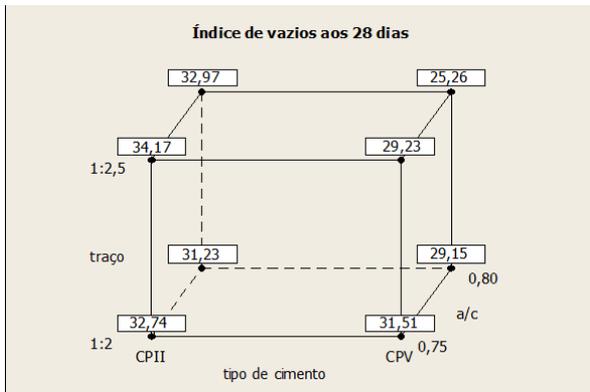


(a)

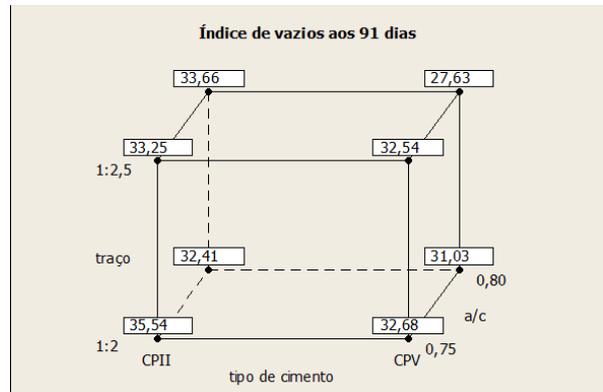


(b)

Figura 5-18 – Cartas de Pareto dos efeitos padronizados para o índice de vazios (a) aos 28 dias de cura; (b) aos 91 dias de cura



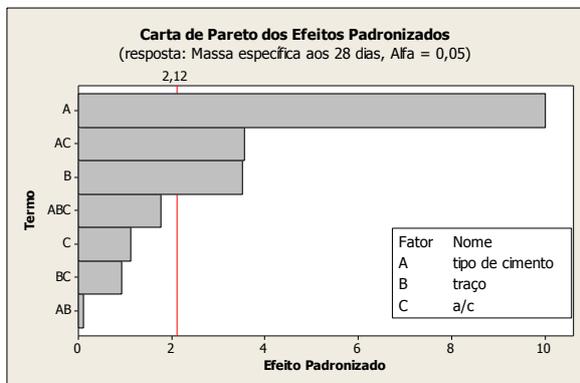
(a)



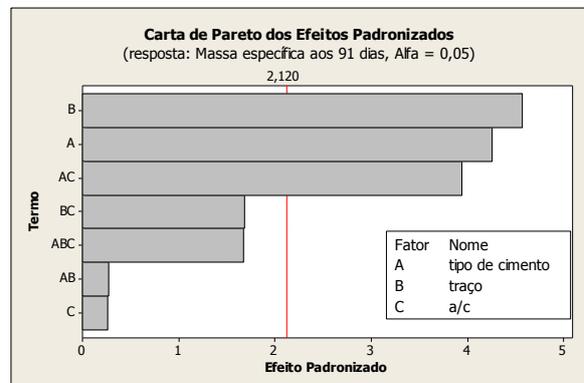
(b)

Figura 5-19 – Apresentação geométrica dos resultados de índice de vazios (%) (a) aos 28 dias de cura; (b) aos 91 dias de cura

A análise dos resultados de massa específica aos 28 e 91 dias de cura através das cartas de Pareto dos efeitos padronizados, apresentadas na Figura 5-20, revela que há efeito significativo das variáveis tipo de cimento e traço. Conforme observado nos resultados apresentados na Figura 5-21, as formulações preparadas com cimento CP II e traço 1:2 apresentaram maior massa específica.



(a)



(b)

Figura 5-20 – Cartas de Pareto dos efeitos padronizados da massa específica (a) aos 28 dias de cura; (b) aos 91 dias de cura

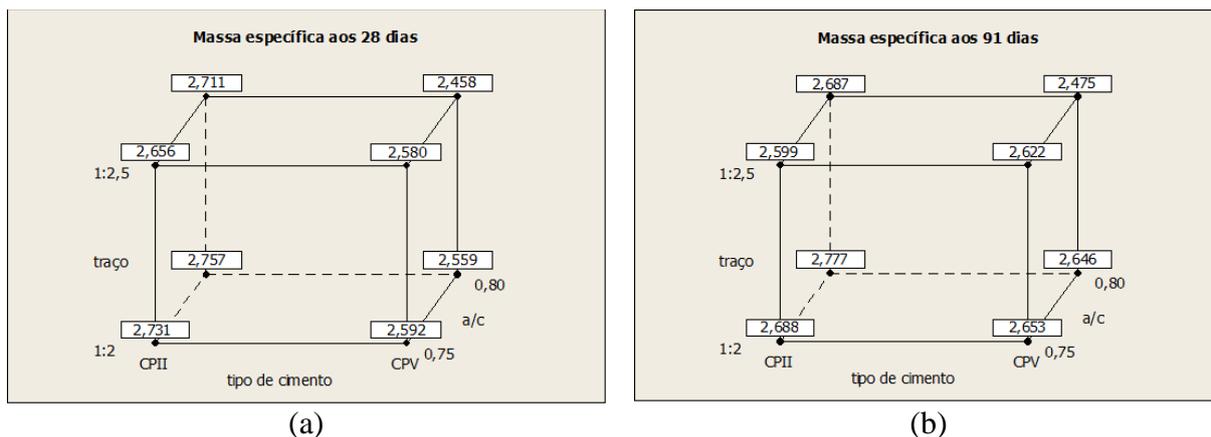


Figura 5-21 – Apresentação geométrica dos resultados de massa específica ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (a) aos 28 dias de cura; (b) aos 91 dias de cura

Conforme apresentado na Figura 5-22, os dados coletados não permitem estabelecer uma correlação direta entre o índice de vazios, que expressa a porosidade total dos corpos de prova ensaiados, e a resistência média à compressão das formulações preparadas após 28 dias de cura.

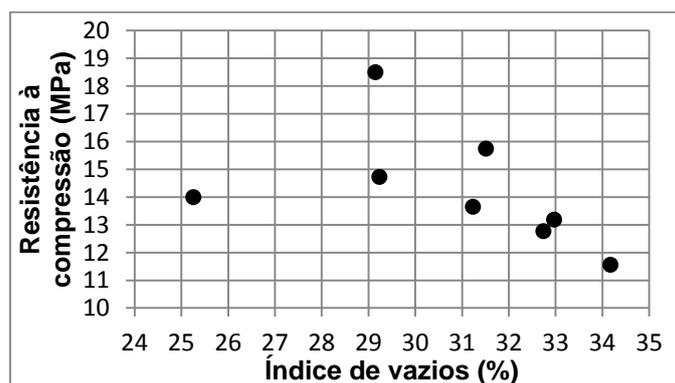


Figura 5-22 – Resistência média à compressão em função do índice de vazios das formulações em estudo

Os resultados de difração de raios X das oito formulações preparadas, após 70 dias de cura, permitem identificar a presença das mesmas fases em todas as amostras, havendo apenas variação nas proporções entre elas. Conforme é apresentado na Figura 5-23, é possível identificar a presença das fases identificadas no resíduo arenoso: quartzo e hematita. Também é constatada a presença das fases portlandita e calcita, formadas a partir das reações de hidratação dos compostos do cimento.

Sabe-se que a difração de raios X permite identificar de forma efetiva apenas fases cristalinas com concentração, em geral, maior que 5%. Embora não detectadas nos difratogramas, as fases do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) estão presentes, conforme pode

ser percebido nas micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura apresentadas a seguir.

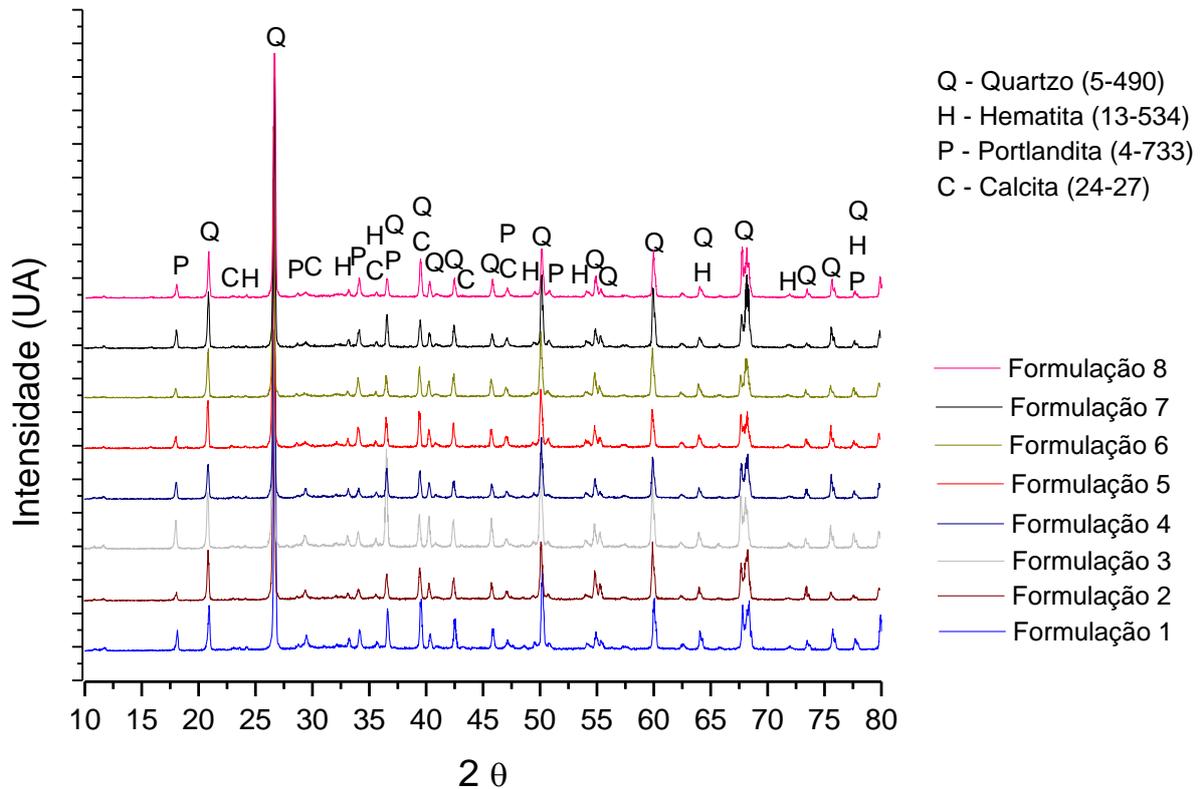


Figura 5-23 – Difratoograma de raios X das oito composições preparadas aos 70 dias de cura

Imagens obtidas de superfícies de fratura por microscopia eletrônica de varredura das oito formulações, após 70 dias de cura, revelam semelhanças na microestrutura dos materiais preparados.

As micrografias da superfície de fratura com aumento de 50 vezes, apresentadas na Figura 5-24, permitem observar o tamanho dos poros em cada formulação.

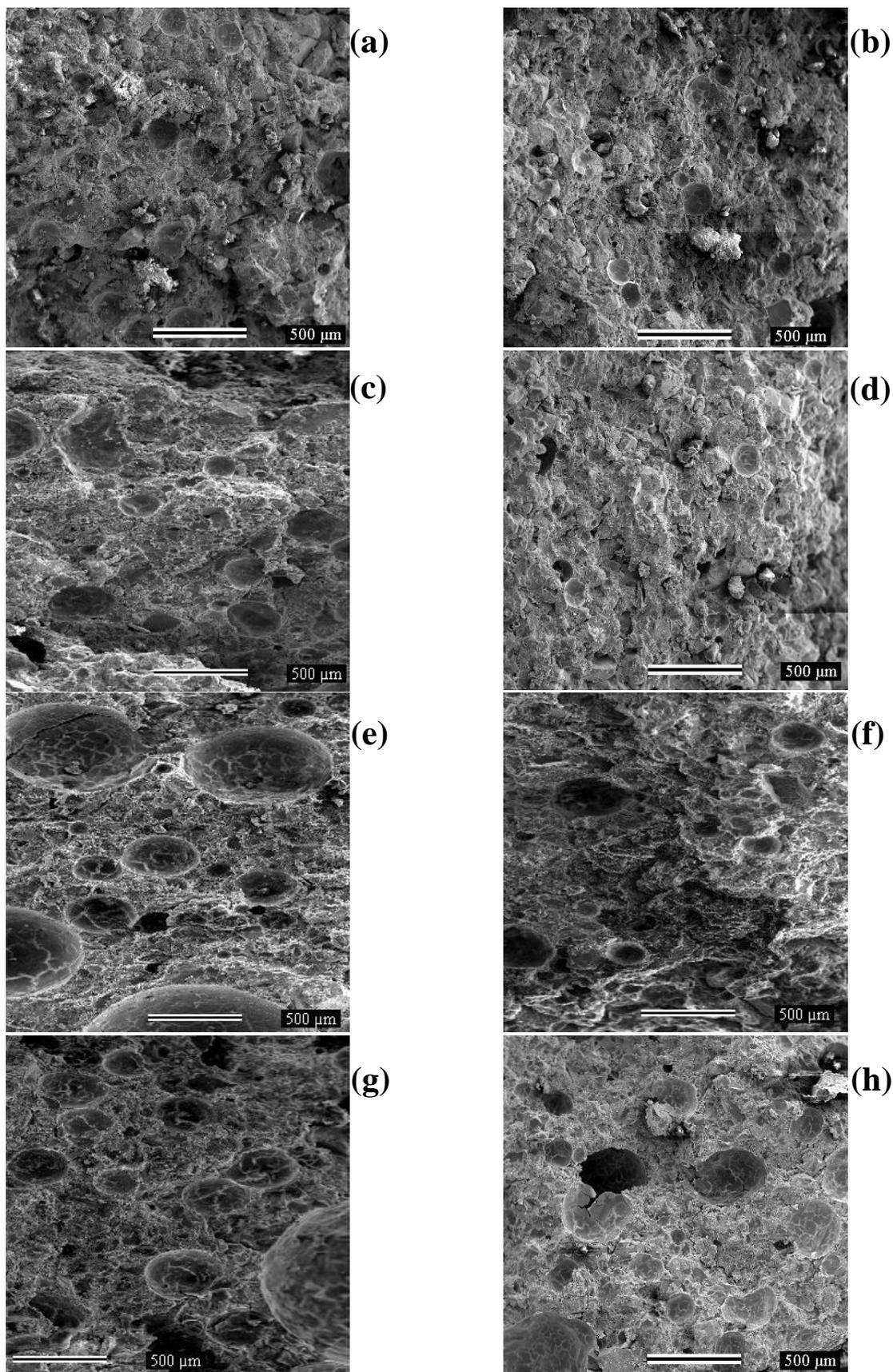


Figura 5-24 – Micrografias das amostras preparadas com cada formulação aos 70 dias de cura com aumento de 50x
 (a) Formulação 1; (b) Formulação 2; (c) Formulação 3; (d) Formulação 4; (e) Formulação 5; (f) Formulação 6; (g) Formulação 7; (h) Formulação 8

Conforme apresentado na Figura 5-24 (a), a microestrutura da formulação 1 apresenta poucos poros. Os poros apresentam forma aproximadamente esférica e diâmetro variando entre 150 e 250 μm . A microestrutura da formulação 2, apresentada na Figura 5-24 (b), revela poucos poros, com tamanho variando entre 100 e 250 μm . A formulação 3, conforme apresentado na Figura 5-24 (c), apresenta poros distribuídos uniformemente, com tamanho variando de 50 a 300 μm . Conforme apresentado na micrografia da Figura 5-24 (d), a formulação 4 apresentou poucos poros, com tamanho da ordem de 150 μm . A formulação 5 revelou na micrografia apresentada na Figura 5-24 (e) a presença de poros com grande variação de tamanho, de cerca de 100 a 750 μm . A formulação 6, conforme apresentado na Figura 5-24 (f), apresentou poros de tamanhos variados, de cerca de 75 a 400 μm . A Formulação 7, conforme apresentado na Figura 5-24 (g), apresentou poros médios a grandes, com tamanhos de cerca de 250 a 850 μm . A formulação 8, conforme apresentado na Figura 5-24 (h), apresenta poros pequenos a médios, variando de cerca de 100 a 400 μm .

Os poros visíveis apresentam forma aproximadamente esférica e variaram de tamanho entre aproximadamente 50 μm a 850 μm . Helene (1993) e Meng (1994) afirmam que poros com dimensões entre 0,1 e 1.000 μm são poros de ar incorporado e contribuem para o transporte de massa por difusão, migração iônica, capilaridade e permeabilidade. Naturalmente, espera-se que o transporte de água ou de íons ocorra com maior facilidade e com maior velocidade em corpos com maior quantidade de poros maiores. Entretanto, há também influência da conectividade entre os poros sobre esses fenômenos. Observa-se que poros são maiores nas formulações 5 a 8, preparadas com cimento CPV do que nas formulações 1 a 4, preparadas com cimento CPII. No entanto, as determinações de índice de vazios, apresentadas na página 44, revelam que a porosidade total dos corpos de prova é menor quando se emprega cimento CPV ao invés de cimento CPII. Sendo assim, o que se observa nos corpos estudados é que, apesar de os corpos de prova preparados com cimento CPV apresentarem poros maiores, esses corpos apresentam menor absorção de água, pois apresentam índice de vazios menor que os corpos preparados com cimento CPII.

Não foram notadas alterações significativas da microestrutura entre as amostras analisadas por MEV aos 70 dias de cura e amostras analisadas por MEV com EDS aos 90 dias de cura. Isso já era esperado, uma vez que as reações que se processam após os 28 dias de cura são muito lentas. Sendo assim, os resultados obtidos com os dois tempos de cura obtidos em diferentes equipamentos são apresentados reunidos, uma vez que se complementam. Na

observação da microestrutura da superfície de fratura das formulações, foram notadas as características descritas a seguir.

Nas imagens de superfície de fratura de amostras preparadas com a formulação 1, constatou-se que as partículas de agregado se encontram bem revestidas pelas fases formadas na hidratação do cimento, sendo que o que se observa em maiores quantidades, são fases com forma semelhante a colmeias, que identificamos como gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) tipo II descrito por Diamond apud Ramachandran e Beaudoin (1999, p. 48).

Observa-se na micrografia apresentada na Figura 5-25 que as partículas de agregado estão bem aderidas à pasta de cimento e que não há superfícies dessas partículas expostas. As micrografias apresentadas na Figura 5-26 apresentam em detalhes imagens da interface entre agregado e pasta de cimento.

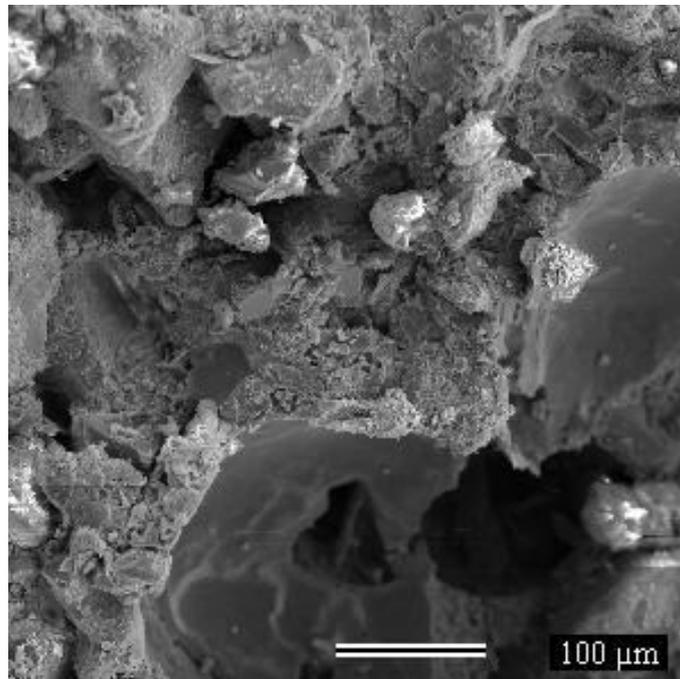


Figura 5-25 – Micrografia da superfície da fratura de amostra da formulação 1 com aumento de 200x

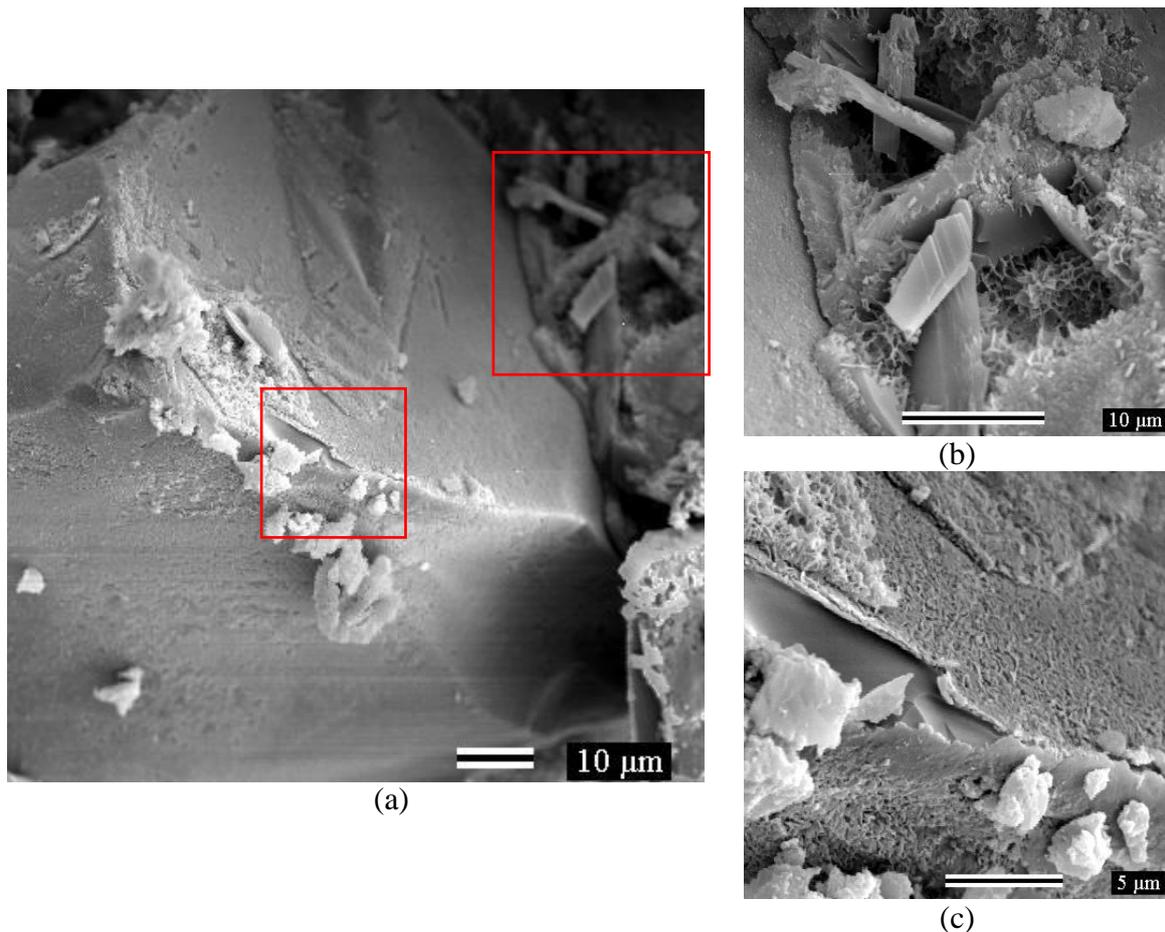
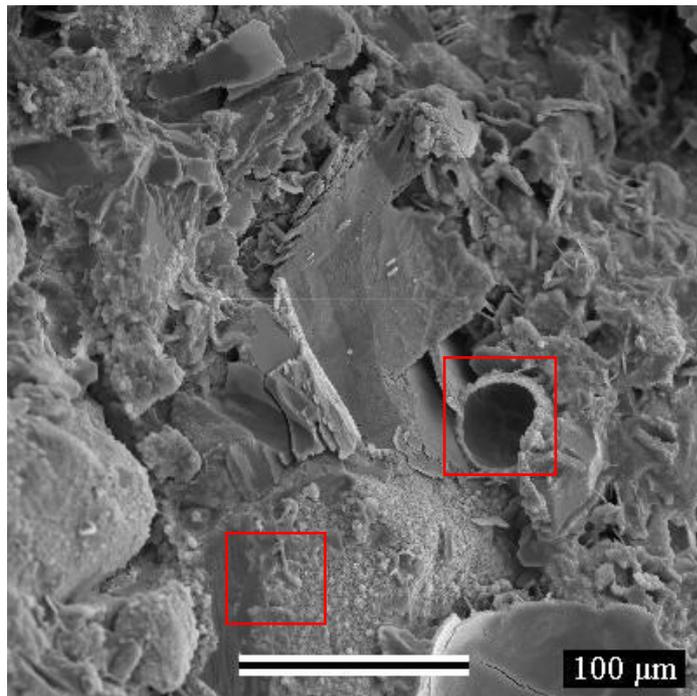


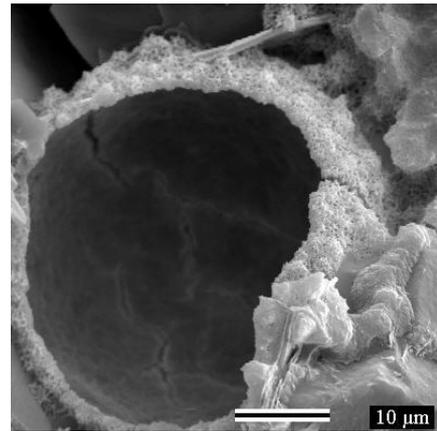
Figura 5-26 – Micrografias das superfícies das fraturas de amostras da formulação 1 (a) aumento de 1.000x; (b) aumento de 3.000x; (c) aumento de 5.000x

Nas imagens de superfície de fratura de amostras preparadas com a formulação 2, constatou-se que as partículas de agregado se encontram bem revestidas pelas fases formadas na hidratação do cimento. Observou-se ainda a presença de cristais em forma de placas hexagonais, que identificamos como portlandita.

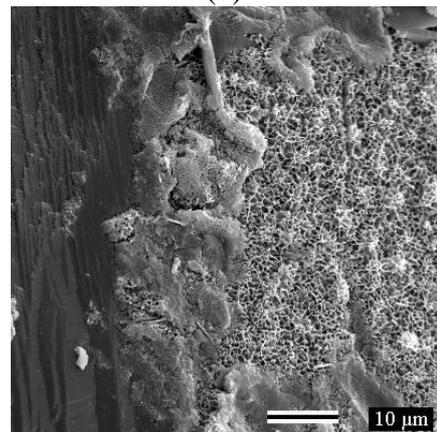
Nas micrografias apresentadas na Figura 5-27 (a), (b) e (c) observam-se detalhes da microestrutura, apresentando um poro fraturado, o qual tem superfície formada por gel C-S-H tipo II e diferentes fases formadas na hidratação dos compostos de cimento. A micrografia apresentada na Figura 5-27 (d) apresenta cristais de portlandita, os quais não identificamos com orientação preferencial. Na Figura 5-27 (e) é possível observar placas de portlandita orientadas perpendicularmente à superfície de uma partícula de agregado, que apresenta sua superfície revestida por gel C-S-H. Na Figura 5-28 é possível observar compostos de cimento com diferentes morfologias.



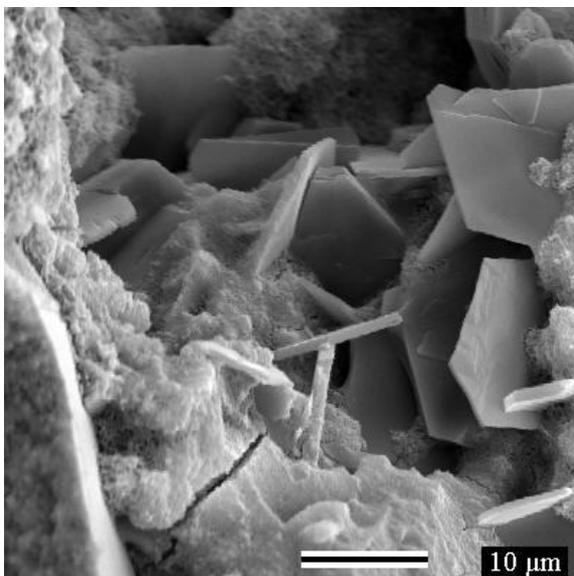
(a)



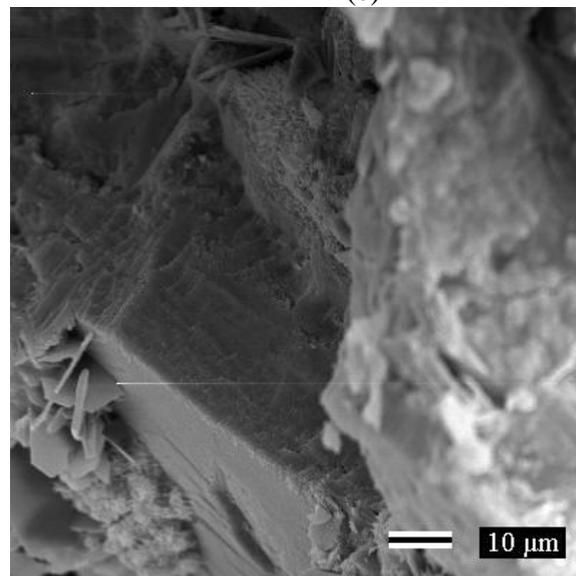
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5-27 – Micrografias das superfícies das fraturas de amostras da formulação 2
(a) aumento de 300x; (b) aumento de 2.000x; (c) aumento de 1.500x; (d) aumento de 2.000x; (e) aumento de 1.000x

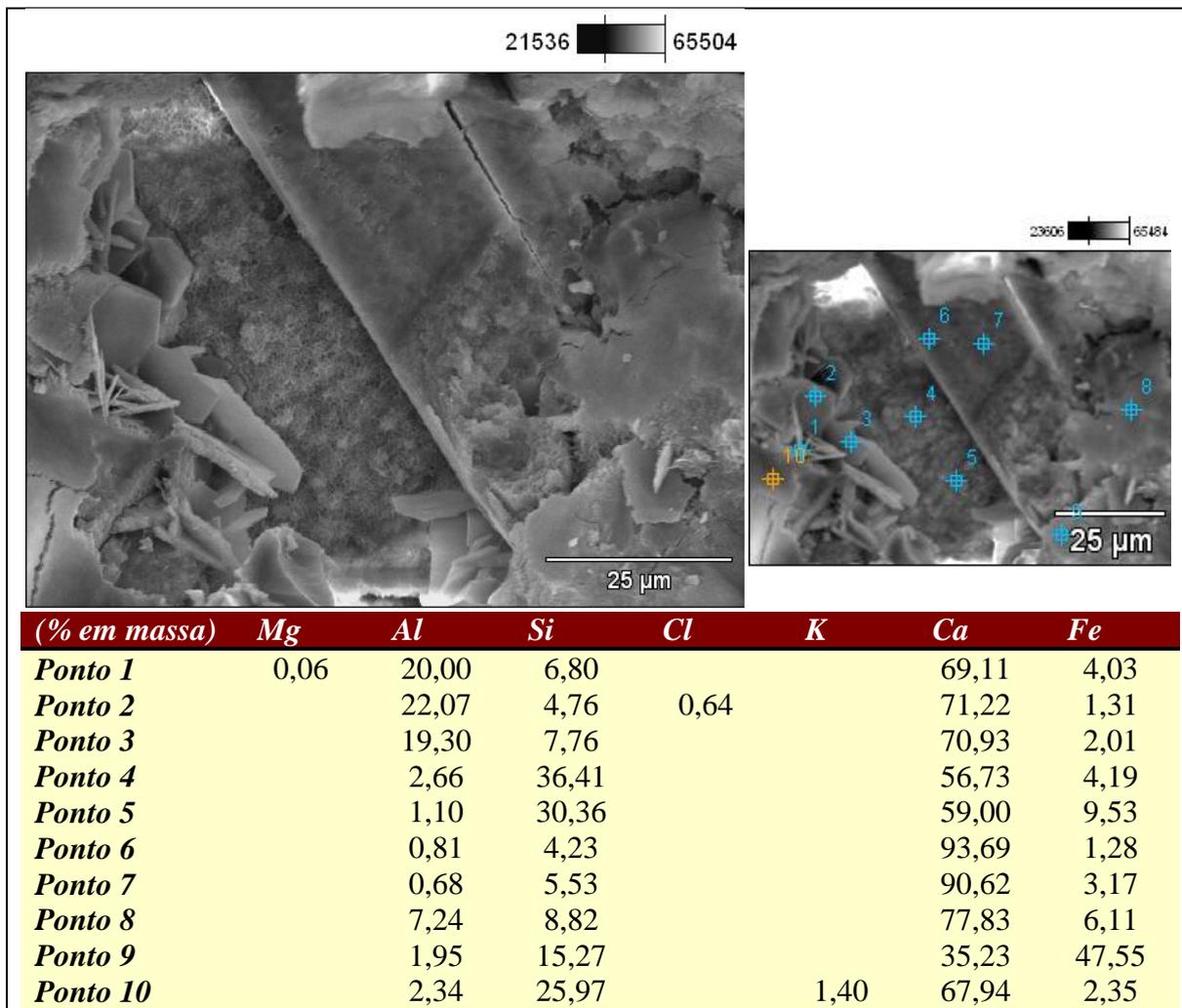


Figura 5-28 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 2 com aumento de 1.500x e resultados de EDS

As imagens de superfície de fratura de amostras preparadas com a formulação 3 revelam características bastante semelhantes às observadas nas formulações 1 e 2. Conforme pode ser observado na Figura 5-29, constatou-se que as partículas de agregado se encontram bem revestidas, principalmente por gel C-S-H tipo II. Observou-se ainda a presença de cristais de portlandita.

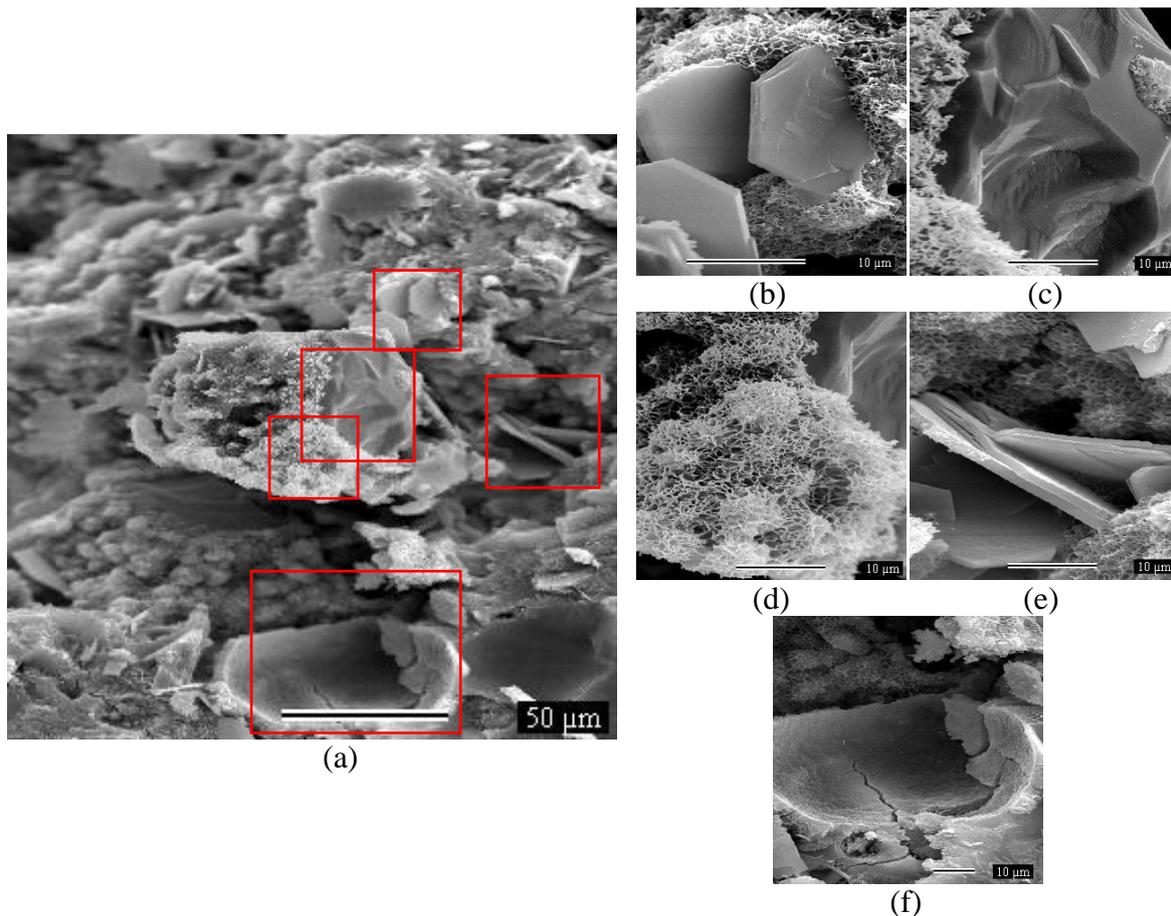


Figura 5-29 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 3 (a) aumento de 500x; (b) aumento de 4.000x; (c)(d)(e) aumento de 3.000x; (f) aumento de 1.440x

Nos resultados de MEV com EDS apresentados na Figura 5-30, é possível observar as partículas de hematita revestidas por gel C-S-H tipo II. Observa-se que apenas com as imagens não é possível diferenciar partículas de hematita de partículas de quartzo, uma vez que ambas apresentam morfologias muito semelhantes.

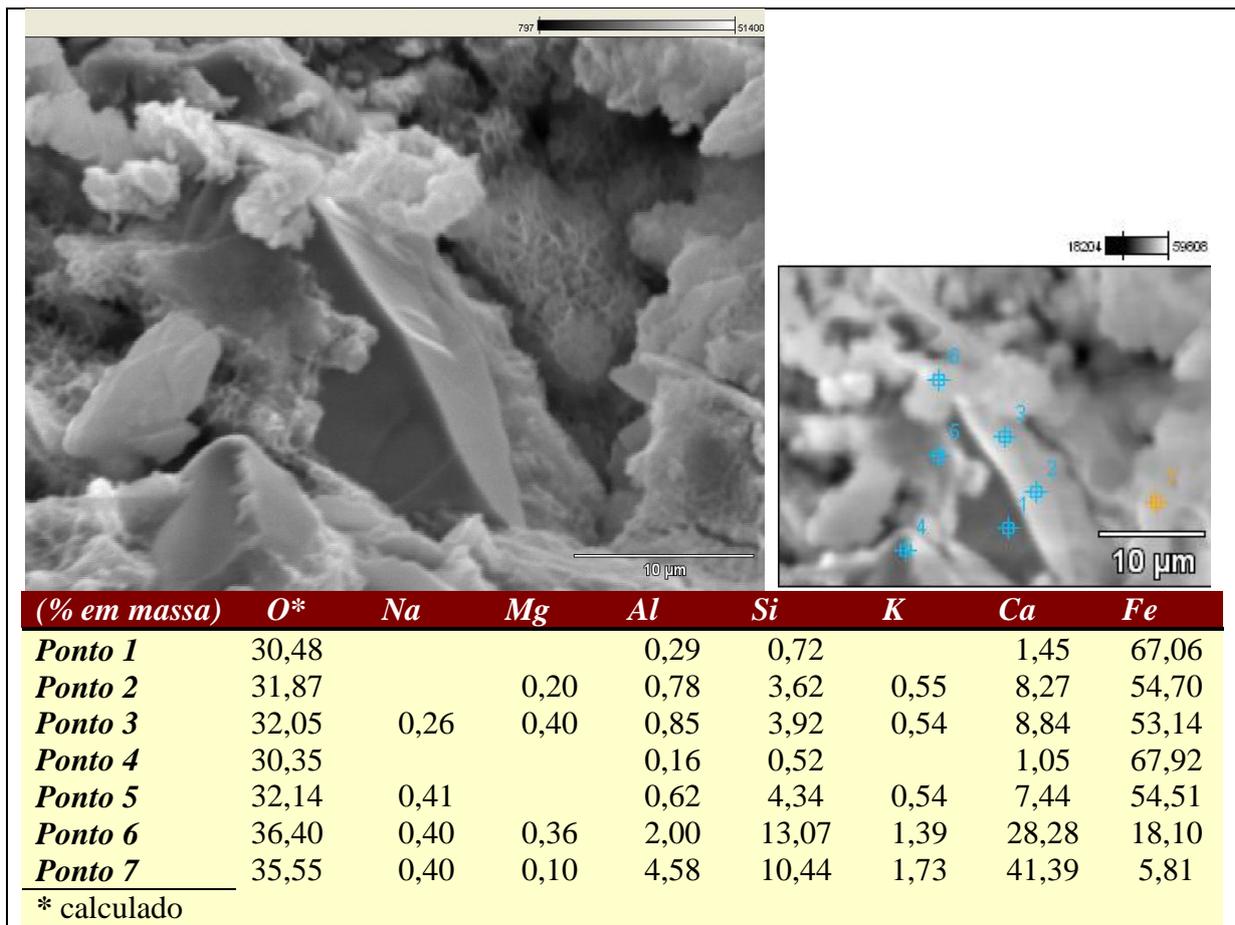


Figura 5-30 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 3 com aumento de 3.500x e resultados de EDS

As imagens obtidas de superfícies de fratura de amostras preparadas com a formulação 4 revelam que as partículas de agregado foram bem revestidas pelas fases formadas na hidratação do cimento e aderiram bem à pasta de cimento. Conforme pode ser visto nas micrografias apresentadas na Figura 5-31, as partículas de agregado estão revestidas por gel C-S-H tipo II. Há ainda a presença de placas de portlandita orientadas perpendicularmente à superfície de partículas de agregado.

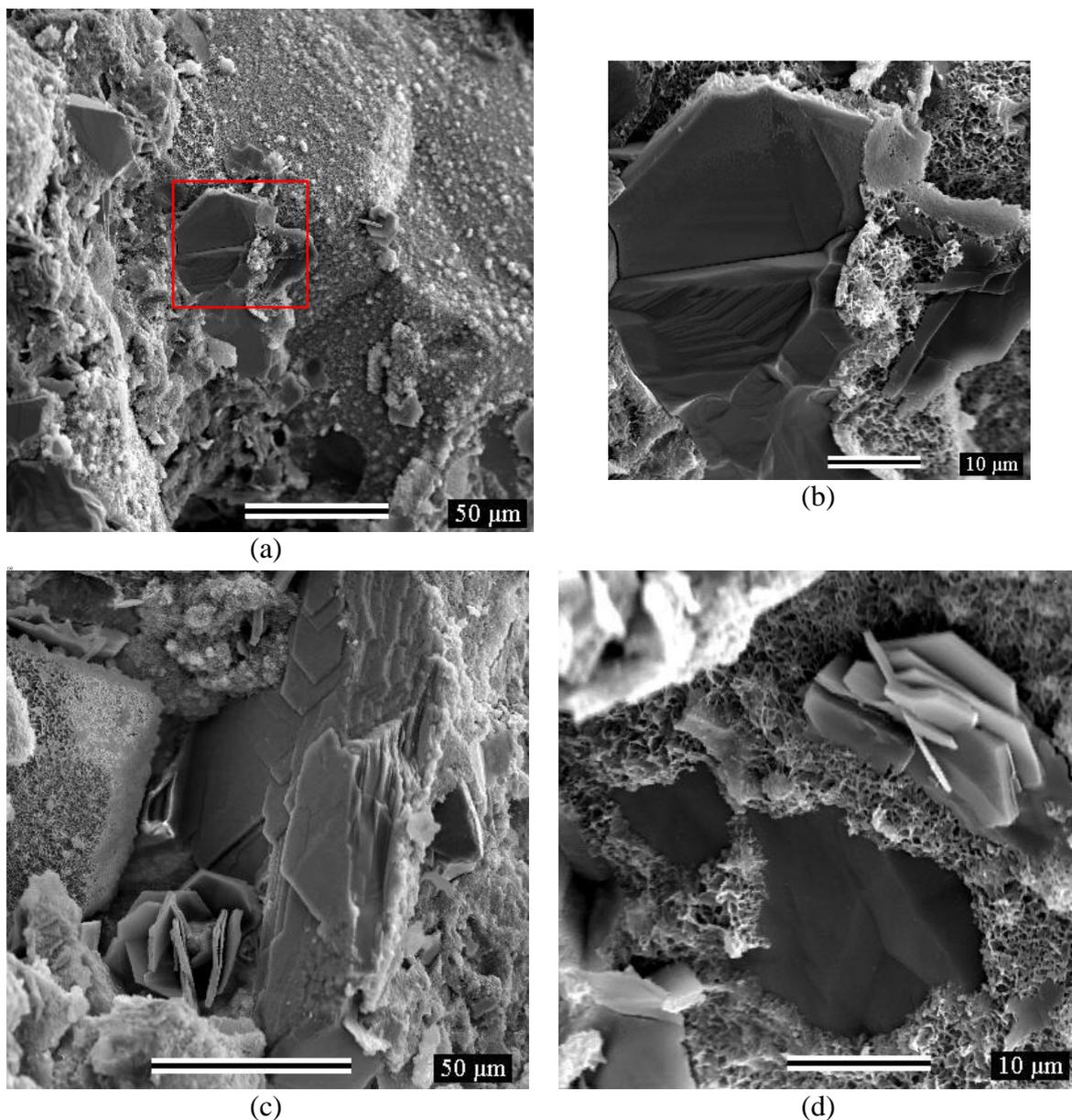
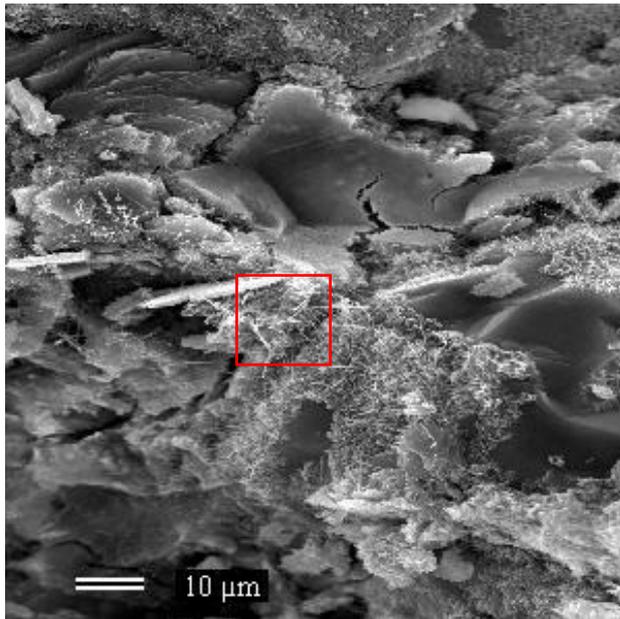
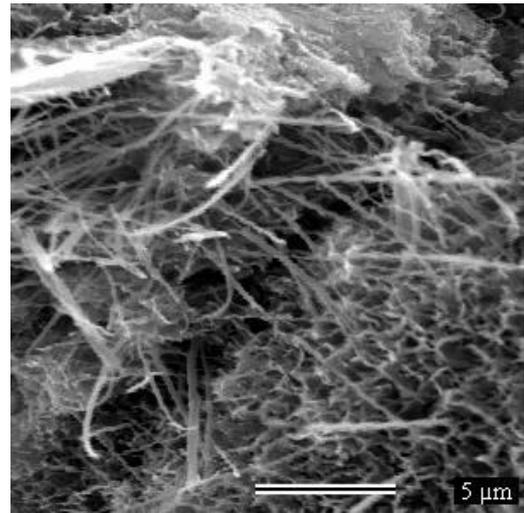


Figura 5-31 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 4 (a) aumento de 500x; (b) aumento de 2.000x; (c) aumento de 700x; (d) aumento de 2.500x

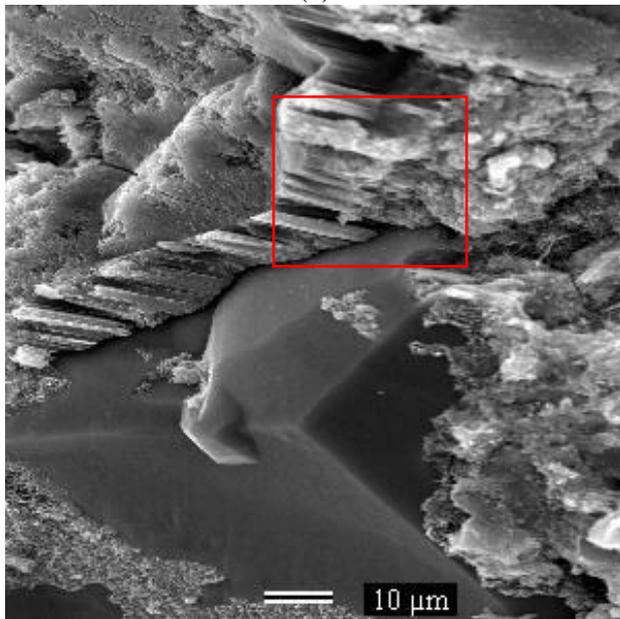
As imagens obtidas de superfícies de fratura de amostras preparadas com a formulação 5 revelam que as partículas de agregado foram bem revestidas pelas fases formadas na hidratação do cimento e aderiram bem à pasta de cimento. Conforme pode ser visto na Figura 5-32, aparecem fases com morfologia diferente das descritas anteriormente. É possível perceber a presença de fases em forma de agulha, que identificamos como etringita. Convém ainda ressaltar que durante a coleta de imagens foi constatado maiores extensões de superfícies de agregado não revestidas do que observado nas formulações 1 a 4.



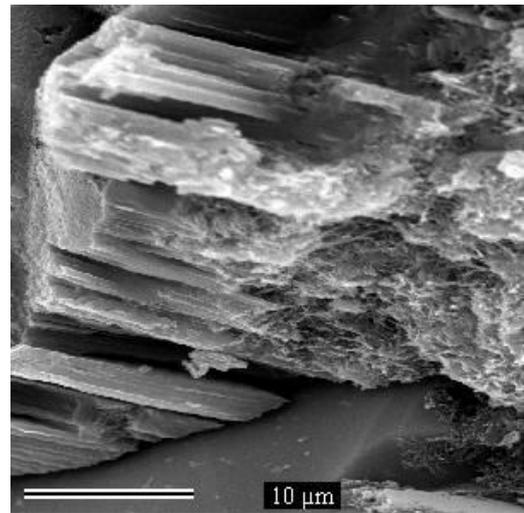
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5-32 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 5
(a) aumento de 1.000x; (b) aumento de 5.000x; (c) aumento de 1.000x; (d) aumento de 3.000x

Nos resultados apresentados na Figura 5-33 é possível observar trincas propagadas em torno de partícula de quartzo. Observa-se ainda partícula de quartzo e de hematita não revestidas.

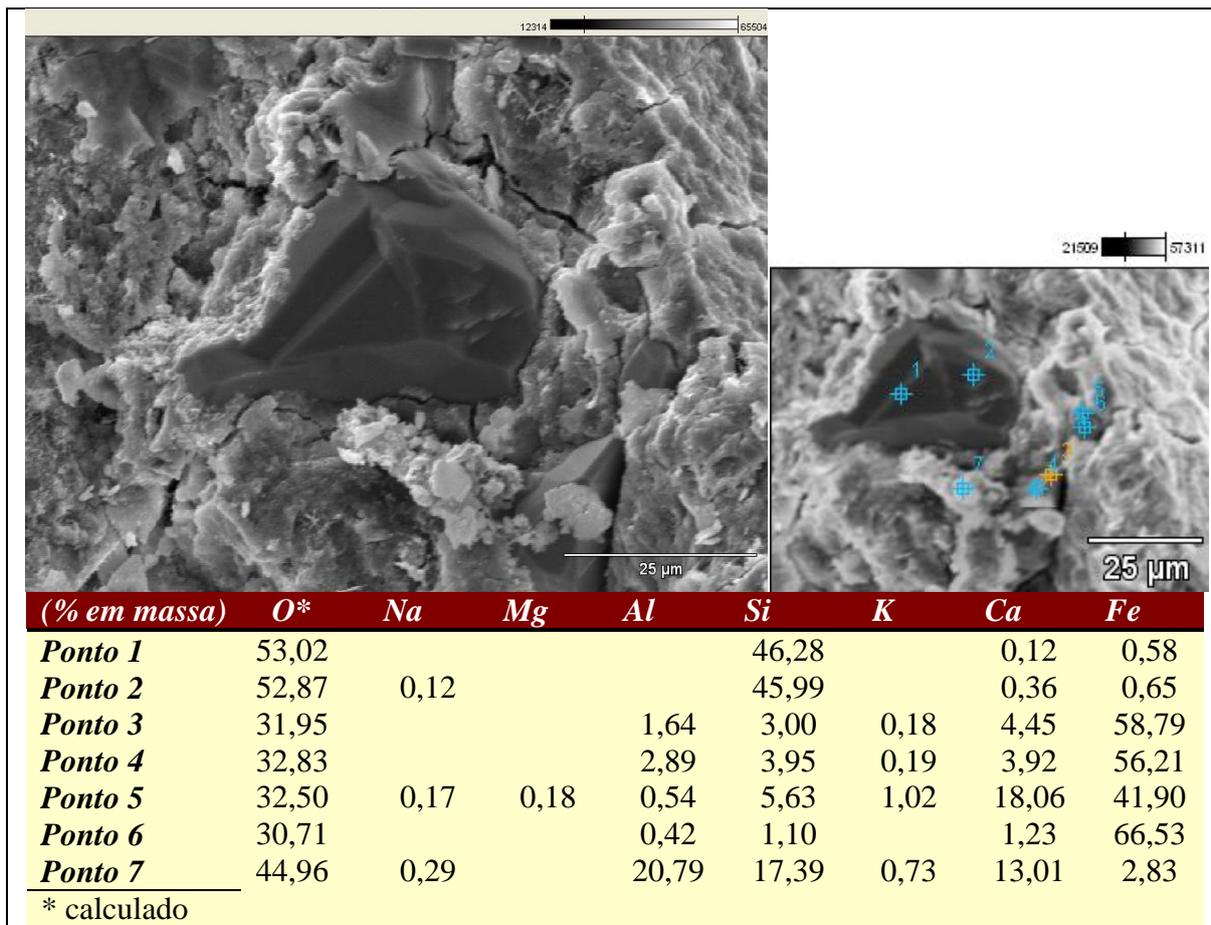


Figura 5-33 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 5 com aumento de 1.500x e resultados de EDS

As imagens obtidas de superfícies de fratura de amostras preparadas com a formulação 6 revelam que as partículas de agregado são revestidas por gel C-S-H tipo II e que as agulhas de etringita estão presentes em grande quantidade. Nas micrografias apresentadas na Figura 5-34 observa-se a presença de placas hexagonais de portlandita, agulhas de etringita e gel C-S-H revestindo partículas de agregado.

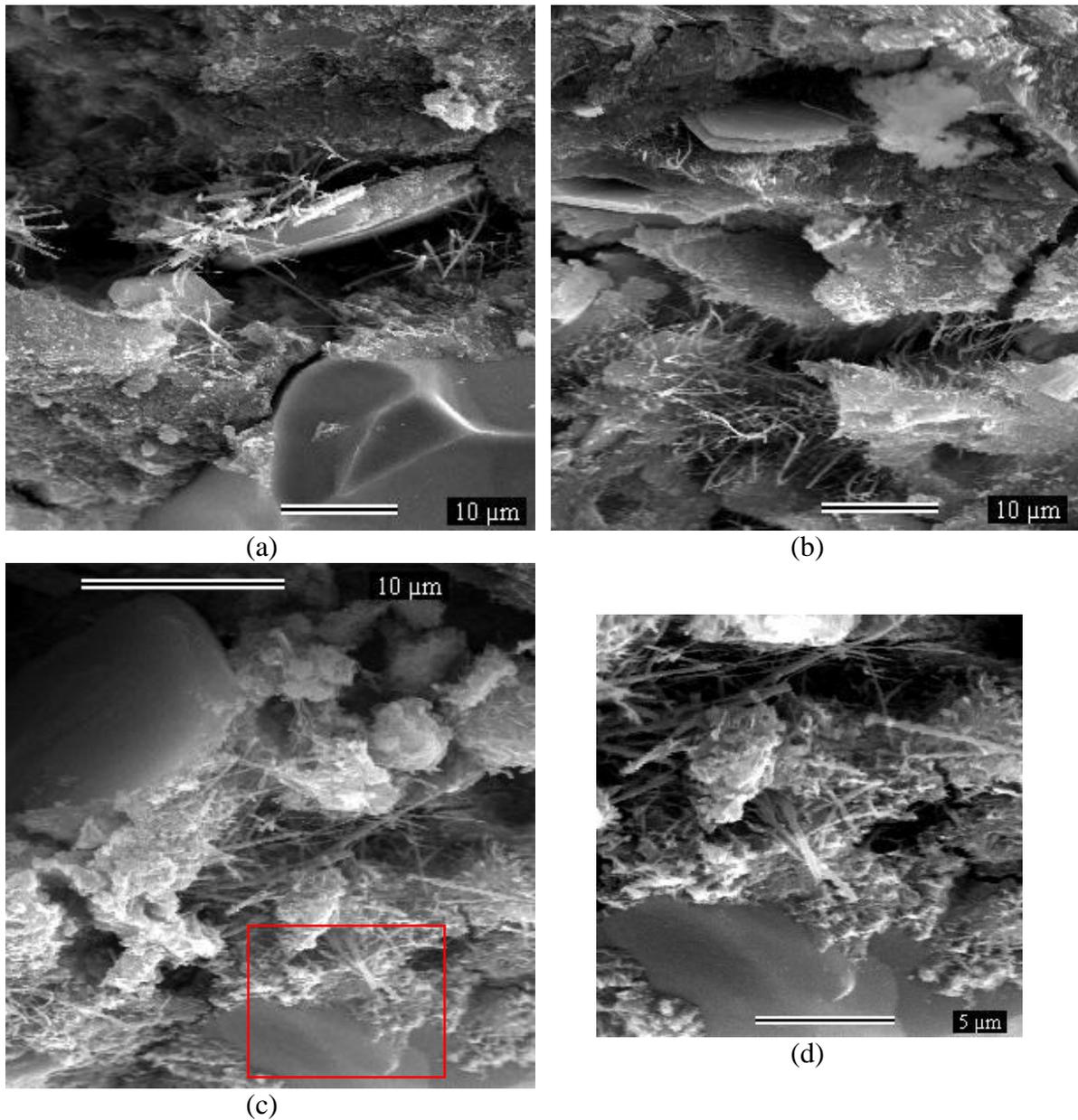


Figura 5-34 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 6 (a)(b) aumento de 2.000x; (c) aumento de 3.500x; (d) aumento de 6.000x

Nos resultados obtidos por MEV com EDS apresentados na Figura 5-35 é possível identificar partículas de quartzo com superfície completamente revestida por compostos de cimento.

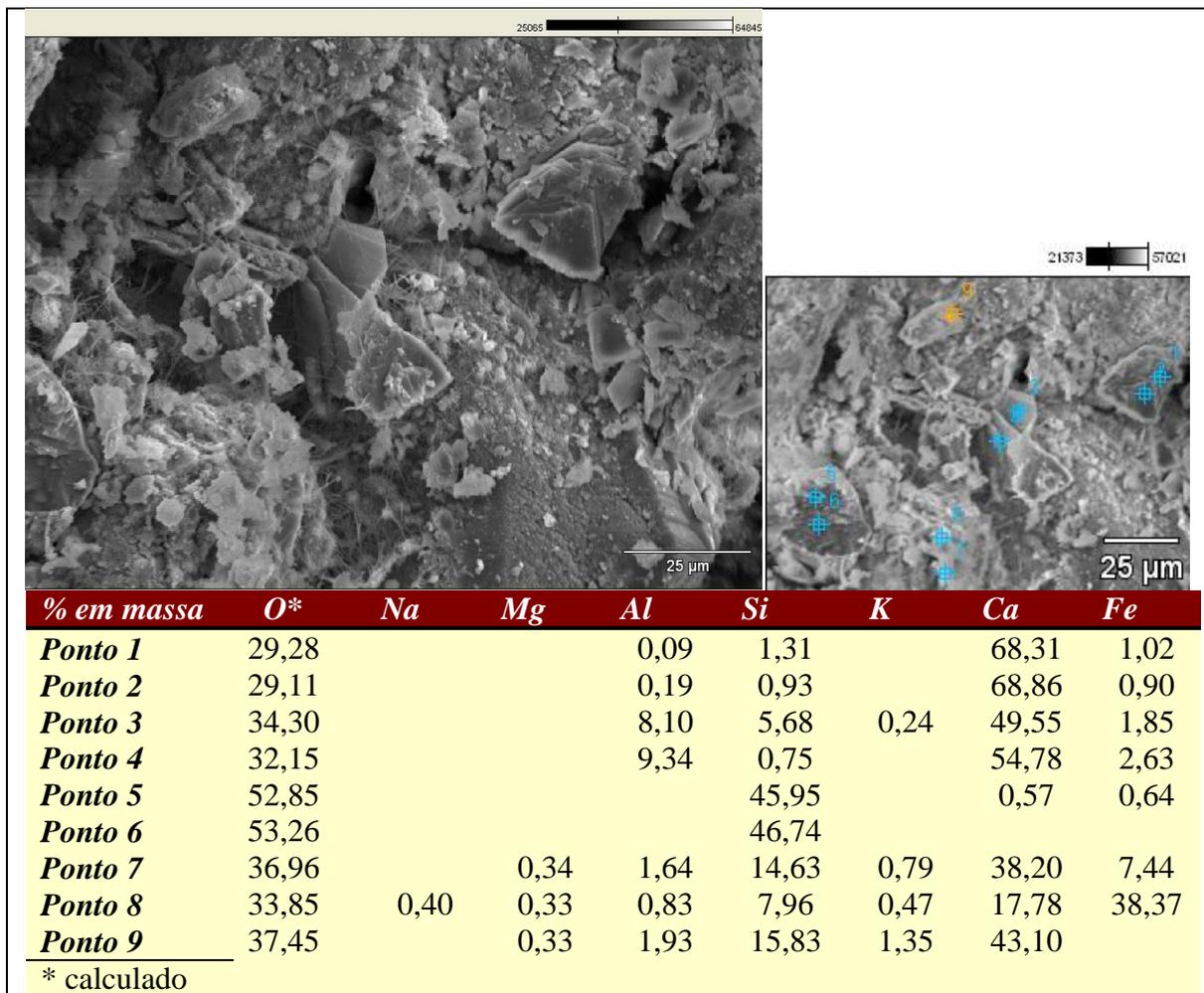


Figura 5-35 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 6 com aumento de 1.000x e resultados de EDS

As imagens obtidas de superfícies de fratura de amostras preparadas com a formulação 7 revelam que as partículas de agregado estão bem revestidas pela pasta de cimento. Nas micrografias apresentadas na Figura 5-36 observa-se a presença de placas hexagonais de portlandita e agulhas de etringita. Na Figura 5-36 (d) é apresentada com maior aumento uma fase que não conseguimos identificar, constituída por pequenas placas, com aproximadamente 1µm de comprimento em sua maior extensão.

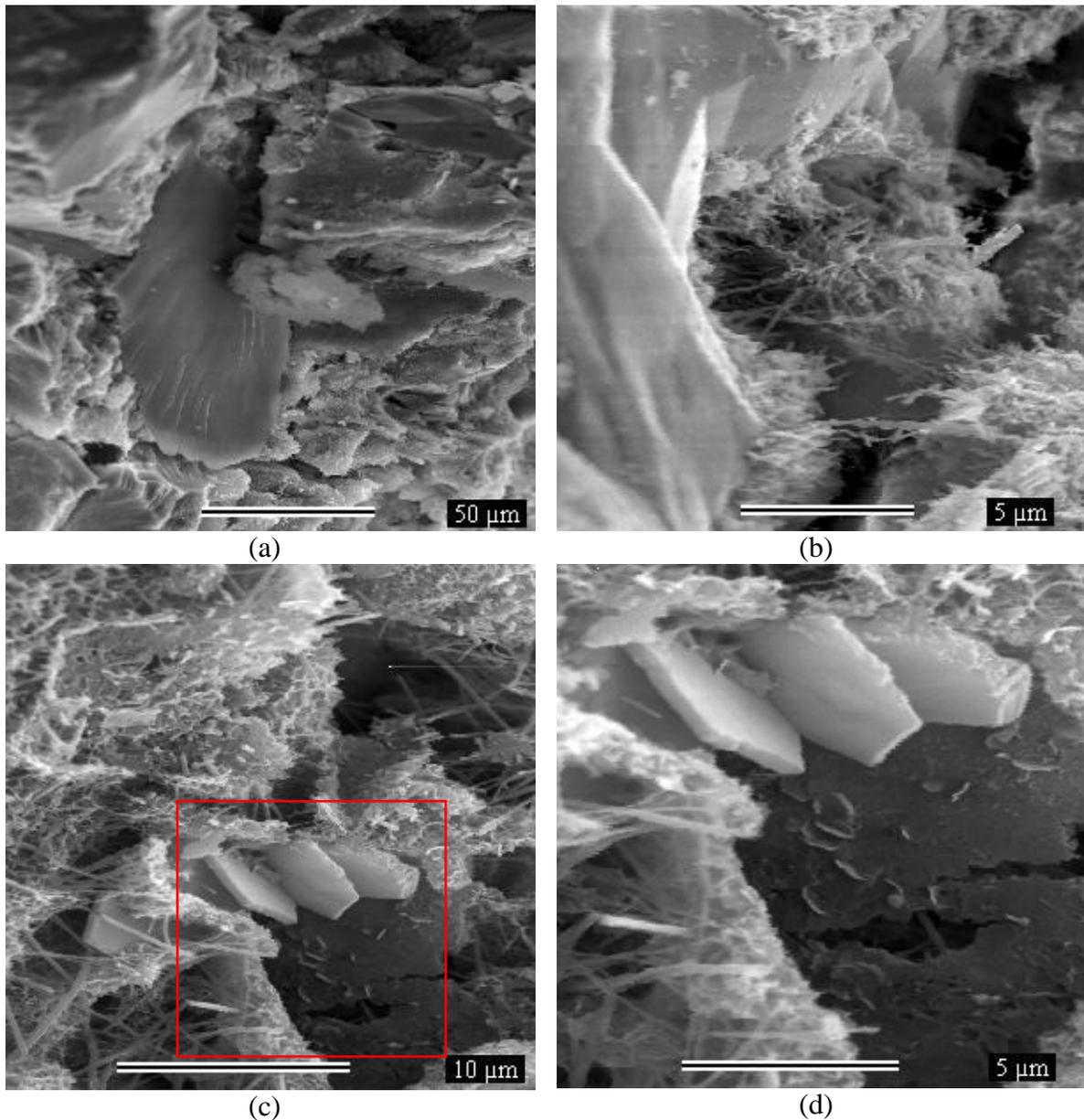


Figura 5-36 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 7
(a) aumento de 600x; (b) aumento de 6.000x; (c) aumento de 4.000x; (d) aumento de 7.500x

As imagens obtidas de superfícies de fratura de amostras preparadas com a formulação 8 revelam muitas partículas de agregado com suas superfícies originais expostas. Observa-se nas micrografias apresentadas na Figura 5-37 que a microestrutura é bastante densa, composta por fases sem forma externa característica e muitas agulhas de etringita, sendo que não foi percebido algum tipo de orientação preferencial das agulhas.

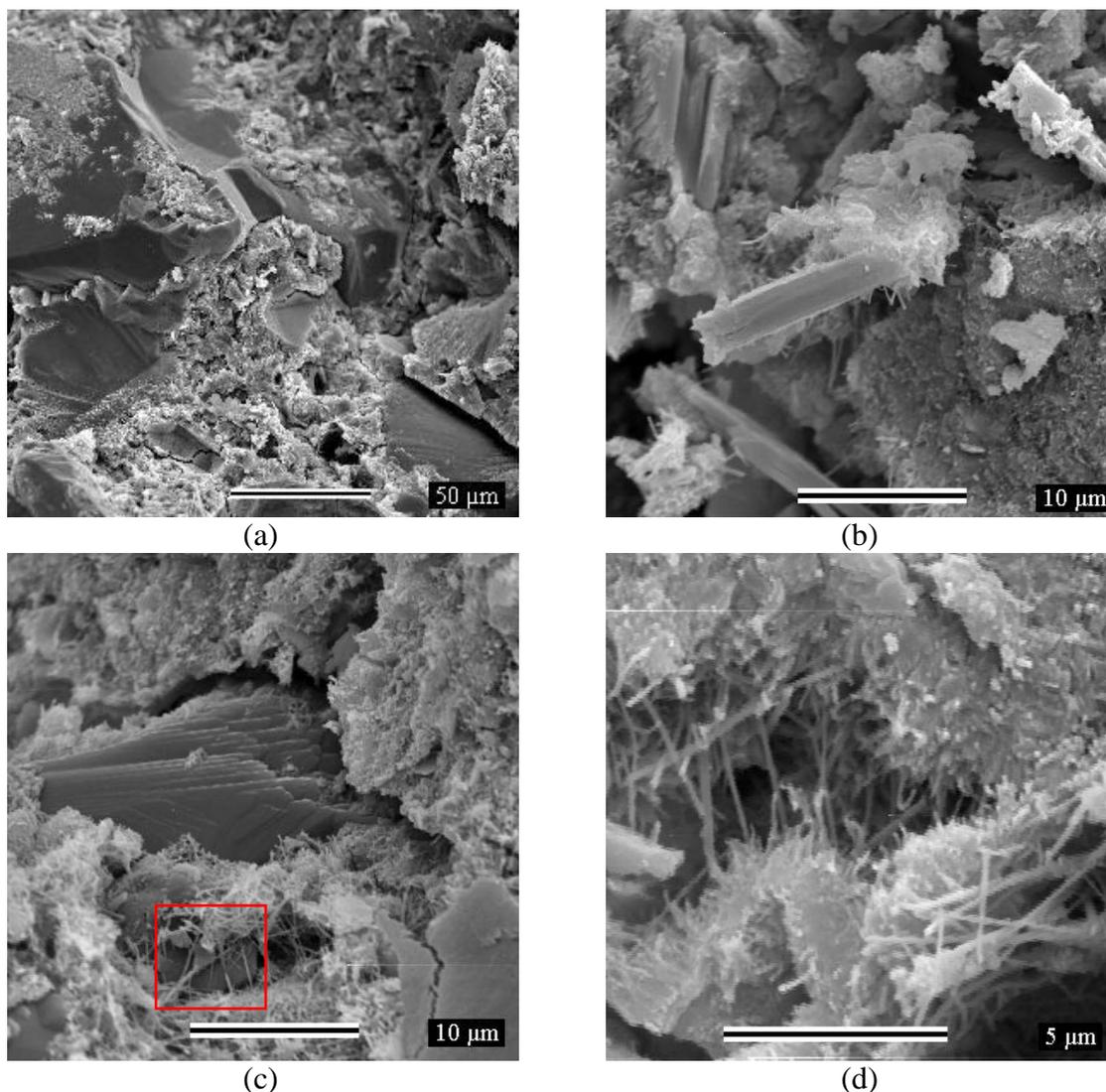


Figura 5-37 – Micrografias da superfície da fratura de amostra da formulação 8 (a) aumento de 500x; (b) aumento de 3.000x; (c) aumento de 3.000x; (d) aumento de 8.000x

As análises realizadas através da microscopia eletrônica de varredura permitiram constatar que as partículas de quartzo e de hematita foram bem aderidas à pasta de cimento. Em vista desta constatação, optou-se por não explorar os efeitos relacionados à zona de transição interfacial entre pasta de cimento e agregado. Foram identificadas diferenças significantes entre a microestrutura dos corpos preparados com cimento C_{PII} e CPV. Nos corpos preparados com cimento C_{PII}, constata-se que as partículas de agregado estão bem revestidas por gel C-S-H, com estrutura reticular em forma semelhante à colméia de abelha e que há placas hexagonais de portlandita. Já nos corpos de prova preparados com cimento CPV, as partículas de agregado apresentam parte de suas superfícies originais expostas, o gel C-S-H não apresenta a estrutura com a forma reticular tão bem marcada e há agulhas de etringita.

6. Conclusões

O resíduo arenoso é classificado como Classe II B (Não perigoso – inerte), constituído por quartzo, hematita e goethita e não contém compostos deletérios aos produtos cimentícios que condenem sua utilização como agregado miúdo.

O resíduo arenoso apresenta dimensão máxima característica de 420 μm e módulo de finura de 0,40. Portanto, não atende aos critérios estabelecidos na NBR 7211 (2009) para emprego como agregado miúdo. Sendo assim, o resíduo arenoso só pode ser usado na preparação de argamassas e concretos após estudos de dosagem comprovarem sua aplicabilidade. Neste trabalho esses estudos de dosagem foram desenvolvidos.

Os estudos realizados comprovam a possibilidade de emprego do resíduo arenoso como agregado miúdo em dosagens com traços 1:2 e 1:2,5 e relação a/c 0,75 e 0,80 utilizando cimentos CII e CPV, tendo sido obtidas argamassas com boa trabalhabilidade ao empregar o superplastificante Sika viscocrete 20 HE na proporção de 0,6% em relação à massa de cimento.

Constatou-se que, para as formulações estudadas, o tipo de cimento tem influência significativa sobre a resistência à compressão, a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica. O emprego do cimento CP V permitiu a obtenção de corpos com maiores resistências à compressão, menor absorção de água, menor índice de vazios e menor massa específica.

Os traços estudados apresentaram efeito significativo sobre a densidade aos 28 dias de cura, a resistência à compressão e a massa específica. O emprego do traço 1:2 permitiu a obtenção de corpos de prova com maiores resistências e maiores massa específica.

A variação da relação a/c causou efeitos significantes sobre a densidade, a resistência à compressão, a absorção de água e o índice de vazios.

Maiores resistências e menor absorção de água são alcançados com o emprego de cimento CP V e relação a/c 0,80, sendo que não foi observado efeito significativo da interação entre esses fatores. Sendo assim, as formulações 6 e 8, são identificadas como as mais adequadas para estudos de viabilidade econômica.

Os estudos da microestrutura através de MEV dos corpos de prova preparados permitiram constatar que as partículas de agregado foram bem revestidas pelos compostos formados na hidratação do cimento e aderiram bem à pasta de cimento.

Diferenças consideráveis foram identificadas entre a microestrutura das argamassas preparadas com cimento CP II e CP V. Entretanto, não foi possível correlacionar diretamente as observações microestruturais com as propriedades mecânicas dos corpos de prova.

Os resultados apresentados neste trabalho revelam que a preparação de argamassas de cimento utilizando resíduo arenoso em substituição a agregados miúdos naturais é tecnicamente viável.

7. Sugestões para trabalhos futuros

Como foi dito ao longo do texto, este trabalho foi desenvolvido como um estudo inicial a respeito da viabilidade técnica de aplicação de um resíduo para obtenção de produtos cimentícios. Muitos resultados relevantes foram obtidos, mas muitos outros estudos ainda são necessários. Listo a seguir apenas algumas sugestões.

- Avaliar o desempenho das argamassas produzidas em diferentes aplicações.
- Estudar a viabilidade econômica do emprego das formulações estudadas neste trabalho, especialmente das formulações 6 e 8, que apresentaram melhores resultados.
- Estudar a evolução da microestrutura de acordo com o avanço da hidratação do cimento.
- Produzir concretos utilizando o resíduo arenoso em substituição ao agregado miúdo.
- Otimização paramétrica das variáveis com auxílio da metodologia de superfície de resposta.
- Variação da quantidade e do tipo de fluidificante.

8. Referências Bibliográficas

ARAÚJO, L. A. D. **Manual de siderurgia**. 2ª Edição. ed. São Paulo: Arte e Ciência, v. I, 2005. 79-96 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 - Concreto - Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003/Emd1:2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ANBT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7389-1- Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7389-2 - Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASTM COMMITTEE E02 ON TERMINOLOGY. **ASTM dictionary of engineering science & technology**. 10ª. ed. Mayfield: ASTM International, 2005. 394 p.

BONAVETTI, V. L.; IRASSAR, E. F. The effect of stone dust content in sand. **Cement and Concrete Research**, v. V.24, n. 3, p. 580-590, 1994.

COSTA, Á. G. D. et al. Geologia de mina na Samarco Mineração: um suporte ao planejamento de curto prazo/controlado de qualidade, com ênfase no controle mineralógico e na previsibilidade do comportamento dos tipos de minério no processo. **III Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro**, Ouro Preto, 25 a 28 novembro 2001.

DE SCHUTTER, G.; POPPE, A. M. Quantification of the water demand of sand in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 517-521, 2004.

GONÇALVES, J. P. et al. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 924-932, 2007.

GONÇALVES, J. R. A.; MELO, E. B.; BASILIO, F. A. **A influência dos superplastificantes na porosidade capilar e na resistência das pastas de cimento Portland**. Congresso Brasileiro de Cimento. São Paulo: ABCP. 1990. p. 117-132.

GOOGLE. **Google Earth**, 2012. Acesso em: 06 fevereiro 2012.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto**. Tese (livre docência). Escola Politécnica, USP. São Paulo. 1993.

HEWLETT, P. C.; RIXOM, R. Superplasticized concrete. **ACI Journal**, v. 74, p. 6-11, May 1977.

HLAVAY, J. et al. Characterization of the particle size and the crystallinity of certain minerals by IR spectrophotometry and other instrumental methods - II. Investigations on quartz and feldspar. **Clays and Clay Minerals**, v. 26, n. 2, p. 139-143, 1978.

JENNINGS, H. M. Design of high strength cement based materials: Part 2 - microstructure. **Materials Science and Technology**, v. 4, n. 4, p. 285-290, 1988.

JOHN, D. A.; POOLE, A. B.; SIMS, I. **Concrete Petrography: A handbook of investigative techniques**. London: Arnold, 1998. 83-185 p.

MACLAREN, D. C.; WHITE, M. A. Cement: its chemistry and properties. **Journal of Chemical Education**, v. 80 (6), p. 623-635, 2003.

MALHOTRA, V. M. **Superplasticizers: a global review with emphasis on durability and innovative concretes**. In: International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa: American Concrete Institute. 1989. p. 209-243.

MALHOTRA, V. M.; MALANKA, D. **Performance of superplasticizers on calcium aluminate monosulfate hydrate, developments in the use of superplasticizers**. In: International Conference on Superplasticizers in Concrete Institute. Ottawa: American Concrete Institute. 1981. p. 209-243.

MAPA, P. S. **Rota de processo para o Underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A.** UFMG. Belo Horizonte, p. 31. 2006.

MARTINS NETO, A. A. A.; DJANIKIAN, J. G. **Aspectos de desempenho da argamassa dosada em central**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 1999.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 6 (2), p. 303-313, 2002. ISSN 1415-4366.

MENG, B. Calculation of moisture transport coefficient on the basis of relevant pore structure parameters. **Materials and Structures**, v. 27, p. 125-134, 1994.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Tradução de Antônio Carmona Filho; Denise Carpanema Coitinho dal Molin, *et al.* São Paulo: Pini Ltda, 1994. 194-208 p.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5th ed. ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

NETO, B. D. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2ªed. ed. Campinas: UNICAMP, 2001.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2ª. ed. São Paulo: Pini Ltda, 1997.

NEVILLE, A.; AÏTCIN, P. C. How the water-cement ratio affects concrete strength. In: NEVILLE, A. **Concrete: Neville's Insights and Issues**. London: Thomas telford, 2006. p. 11-28. ISBN 0727734687.

PIRES, J. M. M. et al. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da Barragem de Germano. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27 (3), p. 393-397, maio 2003. ISSN 0100-6762.

PISCIELA, P.; PELINO, M. FTIR Spectroscopy investigation of the crystallisation process in an iron rich glass. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, p. 1855-1861, 2005.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: Principles, Techniques, and Applications**. New York: William Andrew Publishing, 1999.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M. Superplasticizers. In: RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology**. 2nd Edition. ed. Ottawa: Noyes Publication, 1995. Cap. 7, p. 410-517.

RENGER, F. E. O "Quadro Geognóstico do Brasil" de Wilhelm Ludwig Von Eschwege: breves comentários à sua visão da geologia no Brasil. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 13 (1,2), p. 91-95, 2005. ISSN 0104-4486.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F.; GUIMARÃES, M. L. V. Um modelo para a evolução microestrutural dos minérios de ferro do quadrilátero ferrífero. Parte I - estruturas e recristalização. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 1 (1), p. 65-84, 1993. ISSN 0104-4486.

RUAN, H. D. et al. Infrared spectroscopy of goethite dehydroxylation: III. FT-IR microscopy of in situ study of the thermal transformation of goethite to hematite. **Spectrochimica Acta**, v. 58, p. 967-981, 2002.

SAMARCO. Disponível em: <<http://samarcoqueagentefaz.com.br/relatorio2010/processos-tecnologia-e-produto/processo-produtivo-integrado/>>. Acesso em: 05 Fevereiro 2012.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. D.; LINS, F. F. **Usinas de beneficiamentos de minérios do Brasil**. 2ª Edição. ed. Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2001. 327-341 p. ISBN 8572271414 / 9788572271417.

SILVA, G. P. D. et al. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36 (1), p. 45-52, 2006.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. A review on the viable technology for construction waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 47 (3), p. 209-221, 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2nd edition. ed. London: Thomas Telford, 1997. ISBN 0727725920.

TELLO, C. C. O. D.; HAUCZ, M. J. A.; SELES, S. R. **RT (CT3) CDTN - 0295 Rev.01 - Ensaio de viscosidade em pastas de cimento contendo rejeitos**. CDTN/CNEN. Belo Horizonte. 2008.

VAN DAMME, H.; GMIRA, A. Cement hydrates. In: BERGAYA, F.; THENG, B. K. G.; LAGALY, G. **Developments in clay science**. [S.l.]: Elsevier, v. 1, 2006. p. 1113-1127.

WESTERHOLM, M. et al. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 274-282, 2008.

9. Anexos

Anexo 1 - Relatórios de ensaios de cimento feito pelo fabricante

Anexo 2 - Laudo de classificação de resíduos sólidos apresentado pela SGS GEOSOL
Laboratórios LTDA

Anexo 1 - Relatórios de ensaios de cimento feito pelo fabricante

**Anexo 2 - Laudo de classificação de resíduos sólidos apresentado pela SGS
GEOSOL Laboratórios LTDA**

	PERÍODO	11.06.2009	27.06.2009				OBS :
	MÉDIA	3,3					
# 400 %	DP	0,37					
	n	8					
	MÉDIA						
# 325 %	DP						
	n						
	MÉDIA	4552					
Blaine m2/kg	DP	56					
	n	8					
	MÉDIA	137					
Início Pega min	DP	5					
	n	8					
	MÉDIA						
Expan - mm	DP						
	n						
	MÉDIA	29,3					
R 1dia MPa	DP	0,62					
	n	8					
	MÉDIA	43,3					
R 3 dias Mpa	DP	1,01					
	n	8					
	MÉDIA	47,3					
R 7 dias MPa	DP	0,48					
	n	8					
	MÉDIA	54,4					
R 28 dias MPa	DP	0,91					
	n	8					
	MÉDIA	197					
Fim pega min	DP	8					
	n	8					
	P.F.	3,89					
	SiO2	19,20					
	R.I.	0,48					
	Al2O3	4,96					
	Fe2O3	3,02					
Análise Química	CaO	64,06					
	MgO	0,70					
	SO3	2,82					
	CO2	2,85					
	K2O	0,82					
	P.F. 500°C	0,79					
	C3A teórico	7,75					

	PERÍODO	07.07.2009	01.08.2009				OBS :
	MÉDIA						
# 200 %	DP						
	n						
	MÉDIA	2,8					
# 325 %	DP	0,39					
	n	8					
	MÉDIA	4043					
Blaine m2/kg	DP	120,4					
	n	8					
	MÉDIA	188					
Início Pega min	DP	8					
	n	8					
	MÉDIA						
Expan - mm	DP						
	n						
	MÉDIA	7,8					
R 1dia MPa	DP	1,25					
	n	8					
	MÉDIA	21,6					
R 3 dias Mpa	DP	1,78					
	n	8					
	MÉDIA	30,0					
R 7 dias MPa	DP	1,97					
	n	8					
	MÉDIA	41,8					
R 28 dias MPa	DP	2,01					
	n	8					
	MÉDIA	251					
Fim pega min	DP	6					
	n	8					
	P.F.	4,98					
	SiO2	23,98					
	R.I.	1,77					
	Al2O3	6,98					
	Fe2O3	2,69					
Análise Química	CaO	56,32					
	MgO	2,27					
	SO3	1,34					
	CO2	4,76					
	K2O	0,65					
	P.F. 500°C	0,53					
	C3A teórico	4,45					