

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas
Dissertação de Mestrado

**"Estudo do Comportamento do
Concreto de Cimento Portland
produzido com a Adição do Resíduo de
Polimento do Porcelanato"**

Autor: Guilherme Jorge Brigolini Silva
Orientador: Prof. Wander Luis Vasconcelos
Fevereiro de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Guilherme Jorge Brigolini Silva

"Estudo do Comportamento do Concreto
de Cimento Portland produzido com a
Adição do Resíduo de Polimento do
Porcelanato"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Ciência dos Materiais
Orientador: Prof. Wander Luis Vasconcelos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2005

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e orientador Wander Luis Vasconcelos, pela amizade, pelas orientações e pelo aprendizado.

À Prof.^a Adriana e aos Professores Herman e Abdias pela importante orientação.

Ao Laboratório Materiais de Construção da UFMG pelo empenho e dedicação nos ensaios.

Aos funcionários do Colegiado de Pós-Graduação, pela atenção.

À Cecria, pela atenção e fornecimento do RPP.

À Ciminas, pela doação do cimento, representada pelo Eng^o. Adriano.

Aos colegas mestrandos e doutorandos, pela ajuda e companheirismo.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

Dedico este trabalho a minha família e a minha
esposa Sandra que me apoiaram em todos os
momentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Tema da Pesquisa.....	3
2.OBJETIVOS.....	4
2.1.Objetivos Específicos.....	4
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
3.1.Estrutura do Concreto	
3.1.1.Macroestrutura do Concreto.....	5
3.1.2.Microestrutura do Concreto.....	6
3.1.3.Composição Química do Cimento Portland.....	8
3.1.4.Elementos Indesejáveis no Cimento Portland.....	10
3.1.5.Hidratação do Cimento Portland	11
3.1.6.Zona de Transição Pasta de Cimento / Agregado.....	15
3.1.7.Pasta de Cimento no Estado Fresco	18
3.1.8.Pasta de Cimento no Estado Endurecido.....	19
3.2.Patologia do Concreto.....	21
3.3.Adições Minerai s Usadas em Concretos.....	24
3.3.1.Adições Minerai s como Material de Preenchimento (fíler)	26
3.3.2.Adições Minerai s com Atividade Pozolânica	29
3.3.3.Análise da Atividade Pozolânica.....	36

3.4.Efeito das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco.....	39
3.4.1.Trabalhabilidade	39
3.4.2.Hidratação.....	41
3.4.3.Demanda de água.....	42
3.5.Efeito das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido.....	44
3.5.1.Resistência à compressão axial e resistência à tração	44
3.5.2.Porosidade	45
3.6.Resíduo de Polimento de Porcelanato – RPP	47
3.6.1.Processo de Fabricação do Porcelanato.....	47
3.6.2.Polimento do Porcelanato.....	49
3.6.3.Quantidade de RPP Gerado.....	50

4. METODOLOGIA

4.1.Programa Experimental	52
4.1.1.Caracterização do Resíduo de Polimento do Porcelanato (RPP).....	52
4.1.2.Análise Química Via Úmida.....	52
4.1.3.Análise Química Fluorescência de Raios X	54
4.1.4.Análise Estrutural	54
4.1.5.Granulometria à Laser.....	58
4.1.6.Massa específica e Área Superficial.....	59
4.1.7. Atividade Pozolânica.....	61
4.2.Avaliação dos Concretos com Adição de RPP.....	62
4.2.1.Materiais Utilizados	62
4.2.2.Dosagem dos Concretos.....	63
4.3.Determinação das Propriedades do Concreto no Estado Fresco.....	64
4.3.1.Trabalhabilidade	64

4.4.Determinação das Propriedades do Concreto no Estado Endurecido.....	65
4.4.1.Resistência à Compressão Axial.....	66
4.4.2.Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	71
4.4.3. Porosidade Efetiva.....	74
4.4.4.Análise em MEV através de elétrons secundários e elétrons retro- espalhados.....	77
5.CONCLUSÃO.....	82
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
Anexo 1: Metodologia Usada para as determinações analíticas.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1-Microestrutura do cimento hidratado (MORANVILLE (1992)).....	7
Figura 3.2 - Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita (MEHTA E MONTEIRO, 1994).....	12
Figura 3.3 - Representação da Zona de transição Pasta de cimento e Agregado (Mehta E Monteiro, 1994).....	15
Figura 3.4- Cristais grandes de Portlandita (P) orientados perpendicularmente em relação ao agregado (G) na zona de transição (Moranville E Regourd, 1992).....	16
Figura 3.5- Representação esquemática entre a pasta de cimento e o agregado (Mehta e Monteiro,1994).....	17
Figura 3.6 – Grãos de Quartzo moído (GRIGOLI e HELENE (2001)).....	28
Figura 3.7 – Obstrução de poro capilar por grãos de quartzo moído, sendo colmatado por grãos menores e produtos de hidratação.....	29
Figura 3.8- Efeito da quantidade de pozolana sobre o calor de hidratação do cimento Portland (Massazza, apud Mehta, 1994).....	43
Figura 3.9 – Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante com partículas esféricas e vítreas (Mehta e Monteiro, 1994).....	44
Figura 4.1 – Difração de Raios X do Resíduo de Polimento do Porcelanato.....	55
Figura 4.2 – Morfologia do grão de RPP. (a) elétrons retro-espalhados e aumento de 3000x e (b) elétrons secundários e aumento de 7000x.....	56

Figura 4.3 – Grão de RPP, elétrons retro-espalhados e aumento de 1000x.....	56
Figura 4.4 - Espectograma da região 1 da partícula da figura 4.3.....	57
Figura 4.5 - Espectograma da região 2 da partícula da figura 4.4.....	57
Figura 4.6 – Gráfico diâmetro das partículas (μm) x porcentagem acumulada.....	59
Figura 4.7 - Isoterma de solubilidade.....	62
Figura 4.8 - Resistência à compressão aos 3 dias de idade.....	69
Figura 4.9 - Resistência à compressão aos 7 dias de idade.....	69
Figura 4.10 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade.....	70
Figura 4.11 - Resistência à tração por compressão diametral para 28 dias.....	73
Figura 4.12 – Diâmetro dos poros em relação ao volume acumulado de mercúrio.....	77
Figura 4.13 – Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto de referência com a/c de 0,60 . (a) P – pasta de cimento e B- brita.....	79
Figura 4.14 – Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto de referência com a/c de 0,60.(a) vazio preenchido com cristais de monossulfato hidratado. (b) poros capilares (poros entre os produtos de hidratação do cimento), expansão de cristais.....	80
Figura 4.15 – Detalhe do vazio da microscopia da figura 4.13, mostrando o (a) preenchimento do vazio por cristais de monossulfato hidratado e o (b) espectograma de raios X característico desse cristal.....	80

Figura 4.16 – Zona de transição pasta de cimento/agregado do concreto com 10% de RPP e a/c de 0,60. (a) imagem de elétrons retro-espalhados (b) imagem de elétrons secundários.....81

Figura 4.17– Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto com 20% de RPP e a/c de 0,60.....81

Figura 4.18– Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto com 20% de RPP e a/c de 0,60. (a) e (b) imagens obtidas por elétrons retro-espalhados.....82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação das pozolanas estabelecidas pela NBR 12653.....	31
Tabela 3.2 – Propriedades químicas – NBR 12653	31
Tabela 3.3 – Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chapelle modificado de agregados reciclados de resíduos de materiais de demolição.....	38
Tabela 3.4 -Teor de Ca(OH)_2 nas argamassas (avaliação semi-quantitativa).....	39
Tabela 3.5 - Calor de hidratação de cimentos industriais brasileiros	42
Tabela 4.1 Análise química via Úmida do RPP.....	53
Tabela 4.2 – Granulometria a laser (diâmetro em μm).....	58
Tabela 4.3 - Caracterização do agregado miúdo usado na produção dos concretos.....	63
Tabela 4.4 - Caracterização do agregado graúdo usado na produção dos concretos.....	64
Tabela 4.5 - Dosagem dos concretos executados.....	65
Tabela 4.6 - Abatimento para os concretos.....	66
Tabela 4.7 - Quadro resumo dos ensaios mecânicos de resistência à Compressão Axial...67	67
Tabela 4.8 - Resultado resistência à compressão.....	68
Tabela 4.9 - Resultados da Análise da Variância em relação à resistência à compressão axial dos concretos.....	71

Tabela 4.10 - Quadro resumo ensaios mecânicos de resistência à Tração por Compressão Diametral.....	72
Tabela 4.11 - Resultado resistência à Tração por Compressão Diametral.....	73
Tabela 4.12 Análise de variância para verificar efeito significativo do teor de RPP na resistência à tração por compressão diametral.....	74
Tabela 4.13 – Resultado da porosimetria de mercúrio das amostras de concreto.....	76

RESUMO

As adições minerais têm proporcionado grandes benefícios ao concreto de cimento Portland, melhorando suas propriedades no estado fresco e endurecido. Com o crescente número de resíduos industriais, resultantes dos mais variados processos produtivos, surge a necessidade de reciclagem, evitando o acúmulo de materiais prejudiciais ao meio ambiente.

O resíduo de polimento do porcelanato é um dos resíduos resultantes da indústria cerâmica e aparentemente não apresenta nenhum aproveitamento. A quantidade de resíduo úmido de polimento do porcelanato produzido na fábrica da CECRISA, em Minas Gerais, gira em torno de 20 toneladas por dia. Este material é transportado e lançado em aterros sanitários da prefeitura de Santa Luzia região metropolitana de Belo Horizonte.

Neste trabalho foram realizadas a caracterização física e química do resíduo de polimento do porcelanato (RPP) e a influência do seu uso em concretos de cimento Portland em quantidades de 10 e 20% em relação à massa de cimento. Foram avaliados as propriedades do concreto fresco (trabalhabilidade e consistência), as propriedades do concreto endurecido (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral), os aspectos de durabilidade (índice de poros por porosimetria de mercúrio), atividade pozolânica (método de Fratini) e imagens da microestrutura do concreto através da microscopia eletrônica de varredura. A pesquisa visou constatar a possibilidade do uso do resíduo de polimento de porcelanato como adição mineral ao concreto, melhorando seu desempenho e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

A análise dos resultados permitiu concluir que o resíduo de polimento do porcelanato pode ser usado como adição em concretos trazendo benefícios às propriedades mecânicas e aos aspectos de durabilidade, e que 10% de adição é o teor que apresentou os melhores resultados.

ABSTRACT

The mineral additions have been providing great benefits to the cement concrete Portland, improving their properties in the fresh state and hardened. With the crescent number of industrial residues, resultants of the most varied productive processes, the recycling need appears, avoiding the accumulation of harmful materials to the environment.

The residue of polishing of the porcelanato is one of the resulting residues of the ceramic industry and seemingly it doesn't present any use. Brazil possesses four porcelanato factories today. The amount of humid residue of polishing of the porcelanato produced in the factory of CECRISA, in Minas Gerais, it is around 20toneladas a day. This material is transported and thrown in sanitary embankments of Santa Luzia's city hall, metropolitan area of Belo Horizonte.

In this work they was be accomplished the physical and chemical characterization of the residue of polishing of the porcelanato (RPP) and the influence of his use in cement concretes Portland in amounts of 10 and 20% in relation to the cement mass. They was be appraised the properties of the fresh concrete (workableness, hydration and demand of water), the properties of the hardened concrete (resistance to the axial compression, resistance to the traction for diametrical compression and resistance to the traction in the flexing), the durability aspects (absorption for capillary suction, index of pores and absorption for immersion), activity pozolanic and images of the microstructure of the concrete through the Scanning Electron Microscopy (SEM). The research was seek to verify the possibility of the use of the residue of porcelanato polishing as mineral addition to the concrete, improving his acting and contributing to the maintainable development.

1- Introdução

A reciclagem tem sido desenvolvida para melhorar a qualidade ambiental, diminuindo assim, os resíduos gerados pela atividade industrial. As empresas estão se conscientizando de que a geração de resíduos gera custos, pois requer seu tratamento e disposição em locais apropriados. As indústrias vêm buscando opções para diminuir os custos visando à redução dos impactos ambientais e o aumento da credibilidade perante o mercado consumidor.

O aterro industrial criado para disposição de resíduos sólidos industriais, é uma das alternativas utilizadas pelas empresas para livrarem-se dos resíduos e das multas, entretanto esse processo exige o transporte do material e o pagamento das taxas cobradas por alguns aterros. É importante observar que a reciclagem vem sendo aplicada, alcançando grandes resultados no aspecto econômico, social e ambiental. Dentre as inúmeras vantagens do reaproveitamento dos resíduos, pode-se citar:

- diminuição da quantidade de resíduos enviados para aterros industriais, economizando o custo com transporte e a redução de áreas degradadas;
- economia de energia e recursos naturais;
- melhoria de imagem da empresa frente ao mercado consumidor;
- redução dos custos industriais mediante a incorporação de resíduos em seus processos produtivos.

A Construção Civil é o maior consumidor de matérias primas naturais, contribuindo muito para a degradação do meio ambiente. A utilização de adições minerais tem demonstrado ser muito importante no desempenho do concreto de cimento Portland, tanto nas propriedades do estado fresco e endurecido, como no aspecto da durabilidade. A incorporação de resíduos na produção desses materiais pode proporcionar economia de energia e contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Hoje em dia, sabe-se que ao se projetar uma estrutura de concreto, as características de durabilidade dos materiais em questão devem ser avaliadas com a mesma atenção que as propriedades mecânicas e custo inicial. Este fato faz com que as pesquisas busquem

materiais resistentes e capazes de atender satisfatoriamente o desempenho e características importantes e desejáveis nas estruturas de concreto armado.

Os cimentos Portland apresentaram nos últimos anos várias mudanças tecnológicas que visam à redução do seu custo de produção e a obtenção de desejáveis propriedades específicas. As adições minerais são usadas no concreto como substituição de parte do cimento Portland, podendo apresentar características pozolânicas ou servirem como material de preenchimento, apresentando na maioria das vezes menor custo em relação ao cimento.

O volume de subprodutos industriais, com ou sem propriedades pozolânicas, produzidos mundialmente, é muito superior à demanda na reciclagem. Portanto, é de grande importância o estudo da substituição de parte do cimento do concreto ou argamassa por resíduos com propriedades pozolânicas ou de preenchimento.

A relação de dependência entre o processo de fabricação, sua microestrutura e suas propriedades é fundamental para o estudo tecnológico do concreto ou de qualquer outro material. A Engenharia de Materiais busca os conhecimentos fundamentais quanto empíricos, no sentido de desenvolver, melhorar e aplicar os materiais que atendam às exigências. É indispensável, portanto, a caracterização das adições minerais presentes no concreto, conhecendo a natureza dos materiais, estabelecendo teorias ou descrições que relacionem a estrutura com a composição, as propriedades esperadas e o comportamento.

O setor de materiais cerâmicos para revestimentos internos e externos, usados na construção civil, também produz uma grande quantidade de resíduos. Uma parte é reaproveitada no próprio setor e a outra é descartada. O processo de fabricação do porcelanato dá origem a uma quantidade considerável de resíduo não reaproveitado pelas indústrias. Um dos resíduos produzidos na indústria de porcelanato é proveniente do polimento, necessário para dar acabamento à peça produzida.

A hipótese principal deste trabalho é que a adição do resíduo de polimento do porcelanato (RPP) na fabricação de concretos melhorará o desempenho das propriedades mecânicas e da durabilidade desse material em relação ao concreto sem adição mineral, proporcionando um material de menor custo e contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

1.1.Tema da Pesquisa

Foi proposto o estudo da utilização de resíduos resultantes do polimento do porcelanato como adição mineral na confecção de concretos de cimento Portland. O assunto tratado relaciona-se com o estudo das mudanças microestruturais do concreto, tais como suas propriedades e o seu processamento, procurando viabilizar um material que atenda às especificações de resistência mecânica e durabilidade, contribuindo também, para o desenvolvimento industrial sustentável e preservação do meio ambiente.

2.Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar o resíduo de polimento do porcelanato (RPP) e estudar sua influência como adição mineral na microestrutura do concreto, em sua resistência mecânica e nos aspectos de durabilidade.

2.1. Os objetivos específicos são:

- Caracterização física, química e microestrutural do RPP;
- Estudar a influência do RPP na microestrutura do concreto;
- Avaliar o papel do RPP em propriedades do concreto no estado fresco;
- Avaliar a influência do RPP nas propriedades do concreto endurecido, por meio de parâmetros de resistência à compressão axial e resistência por compressão diametral;
- Avaliar os aspectos de durabilidade do concreto com adição de RPP avaliando sua porosidade;
- Definir o teor ótimo de adição do RPP em concretos.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Estrutura do Concreto

ASTM define o concreto como um material compósito que consiste essencialmente de um meio ligante no qual estão imersas partículas ou fragmentos de agregado. No concreto de cimento hidráulico, o ligante é formado a partir de uma mistura de cimento hidráulico e água.

3.1.1. Macroestrutura do Concreto

A macroestrutura do concreto apresenta a pasta do cimento endurecida que envolve as partículas de agregado graúdo (brita) e miúdo (areia), apresentando também a zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), cada uma das fases do concreto é de natureza multifásica, sendo que cada partícula de agregado pode conter vários minerais, além de fissuras e vazios. A matriz da pasta de cimento apresenta uma distribuição heterogênea, de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras, e as mudanças microestruturais que ocorrem nos compostos formados na hidratação do cimento com o decorrer do tempo.

A distribuição granulométrica do agregado influencia o empacotamento dos grãos alternando a fração volumétrica de agregado a ser incorporada em uma mistura de concreto. A fração volumétrica está relacionada principalmente ao módulo de deformação do concreto e à demanda de água na mistura.(DAL MOLIN, 1995).

A fase representada pelo agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Alguns agregados possuem elementos que reagem com alguns compostos do cimento, prejudicando o concreto. A forma, a granulometria e a textura do agregado influenciam também nas propriedades do concreto. Agregados com grande diâmetro característico ou de forma lamelar

facilitam a formação de um filme de água junto às paredes de agregado (exsudação), aumentando a porosidade da região e conseqüentemente enfraquecendo sua ligação com a pasta (zona de transição pasta de cimento e agregado). Agregados com diâmetro grande podem apresentar maior probabilidade de conter vazios e microfissuras internas. É importante observar que independente da alta resistência à compressão dos agregados, estes pouco influem na resistência inicial do concreto, pois os esforços tendem a romper na região de menor resistência mecânica. Entretanto, com o passar do tempo a resistência da pasta aumenta, podendo até superar a do agregado.

3.1.2. Microestrutura do Concreto

A pasta de cimento envolve os grãos de areia e agregados graúdos (geralmente brita gnaisse ou calcária) e é constituída por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento. Os mais importantes são os silicatos hidratados de cálcio (C-S-H) que podem aparecer como estruturas fibrosas (estrutura amorfa), o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 (portlandita) que cristaliza em grandes placas hexagonais superpostas e a etringita.

O estudo do concreto está fortemente ligado à análise da microestrutura, caracterizando cada constituinte e sua influência no material.

As estruturas cristalinas de cimento Portland apresentam grandes vazios estruturais que são responsáveis pela alta energia e reatividade dos cimentos. Alguns valores dimensionais típicos dos principais componentes dos concretos são, de acordo com RIGO (1998), apresentados a seguir:

Diâmetro médio dos componentes do concreto:

a) Agregados graúdos	10 a 30 mm
b) Agregados miúdos	± 1 mm
c) Cimento	10 a 50 μm
d) Adições minerais bastante finas (microsílica)	$\pm 0,1$ μm
e) Adições minerais finas (cinzas volantes)	3 a 20 μm
f) Grãos de clínquer não hidratados	± 25 μm

Tamanho médio de sólidos e vazios na pasta de cimento endurecida:

g) Vazio de ar aprisionado	1 a 3 mm
h) Bolhas de ar aprisionado	1 a 50 μm
i) Cristais hexagonais de Ca(OH)_2 ou de monossulfato na pasta de cimento	0,7 a 1,5 μm
j) Agregações de partículas de C-S-H	0,7 a 1,5 μm
k) Vazios capilares	0,01 a 1 μm
l) Espaçamento interlamelar na estrutura do C-S-H	0,001 a 0,003 μm

MORANVILLE (1992) mostra na micrografia da figura abaixo, obtida pelo microscópio eletrônico de varredura, através de elétrons secundários, parte da microestrutura do cimento hidratado, evidenciando o C-S-H, Ca(OH)_2 e vazios capilares.

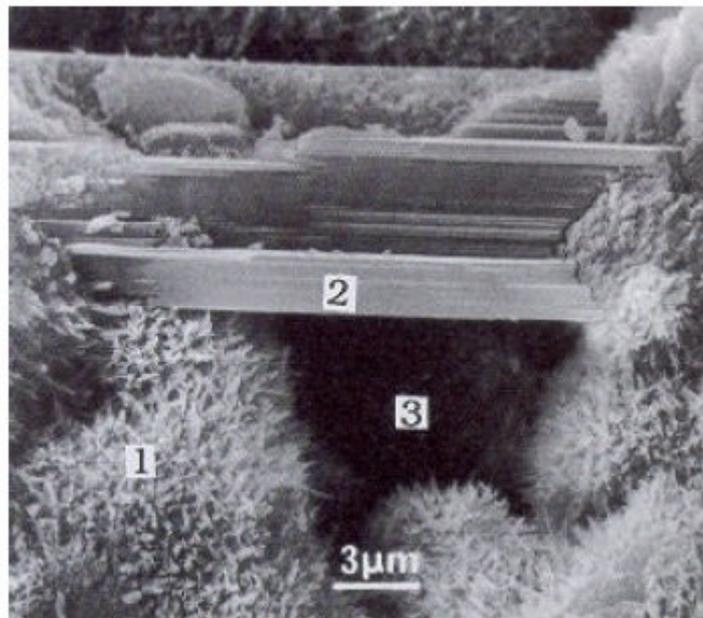


Figura 3.1-Microestrutura do cimento hidratado (MORANVILLE (1992)).

1 - C-S-H; 2 - Ca(OH)_2 (portlandita) e 3 - vazio capilar.

A porosidade total da pasta de cimento Portland fica entre 25% a 30% do volume da pasta para uma relação água/cimento de 0,5.

3.1.3. Composição Química do Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico utilizado em grande escala como ingrediente básico na produção do concreto ou argamassa. Todos os anos, toneladas de cimento Portland são produzidas no mundo. De acordo com LEA (1971), a produção de cimento Portland gera um volume imenso de dióxido de carbono. Isso se deve em parte à grande quantidade de energia necessária para elevar as temperaturas dentro dos fornos de cimento aos 1.450°C necessários para calcinar o carbonato de cálcio (oriundo do calcário), e também ao fato de que o processo de conversão em si gera dióxido de carbono.

Para cada tonelada de cimento Portland que emerge dos fornos, cerca de uma tonelada de CO₂ escapa para a atmosfera. A produção de cimento é responsável por cerca de 7% das emissões artificiais totais de dióxido de carbono no mundo, sendo maior ainda em países em desenvolvimento.(PETRUCCI,1975)

O cimento Portland é constituído principalmente de material calcário, como rocha calcária ou gesso, e alumina e sílica, encontrados como argilas ou xisto. Esta matéria prima é moída e misturada nas proporções adequadas e queimada a uma temperatura de cerca de 1450°C, formando pelotas, através da fusão desses ingredientes, conhecidos como clínquer.

O clínquer é obtido a altas temperaturas de uma mistura de calcário (Carbonato de Cálcio) e argila (aluminossilicatos). Na sua composição química, os principais constituintes são os silicatos, aluminatos e a gipsita para inibir a tendência à pega instantânea. (LEA, 1971).

A mineralogia do clínquer Portland é muito complexa, apesar de ser formada basicamente por quatro fases (C_3S alita, C_2S belita, C_3A celita e C_4AF brownmillerita). Os principais constituintes do cimento Portland (material não hidratado) são (RIGO, 1998):

a) os silicatos de cálcio:

- C_3S (Alita -silicato tricálcico $3CaO - SiO_2$)

- C_2S (Belita -silicato dicálcico $2CaO - SiO_2$),

b) os aluminatos de cálcio:

- C_3A (aluminato tricálcico $3CaO - Al_2O_3$)

- C_4AF (ferroaluminato de cálcio $4CaO - Al_2O_3 - Fe_2O_3$).

c) a gipsita é adicionada para inibir a tendência à pega instantânea ocasionada pela grande reatividade do C_3A .

A Alita (silicato tricálcico, Ca_3SiO_5) forma o volume do clínquer (40 – 70% por massa) com tamanhos de cristais sobre 150 μm . A Alita geralmente apresenta uma seção transversal de um cristal hexagonal e reage rapidamente com a água, sendo portanto responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica nos primeiros 28 dias.

A Belita (silicato dicálcico, Ca_2SiO_4) forma 15 a 45% do clínquer, e apresenta tamanho de cristais variando de 5 a 40 μm . A Belita é menos reativa do que a alita, mas contribui para as resistências acima de 28 dias. Na hidratação, ambos a alita e a belita formam o silicato hidratado de cálcio (C-S-H) e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$).

O aluminato tricálcico, $Ca_3Al_2O_6$, abrange 1 a 15% do clínquer como pequenos cristais de 1 a 60 μm , preenchendo a área entre os cristais de ferrita. O aluminato tricálcico pode ocorrer na forma cúbica ou orthorhombica, podendo conter 7% menos de óxidos. É mais reativo com a água.

A ferrita (tetracálcio aluminaferrita, $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})\text{O}_5$), compreende entre 0 e 18% do clínquer com cristais freqüentemente dendríticos, prismáticos e volumosos.

Algumas fases em menores quantidades, mas que ainda influenciam no desempenho, podem ser encontradas, tais como o periclásio (MgO) e a cal livre (CaO).

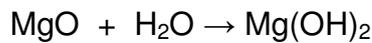
3.1.4 Elementos Indesejáveis no Cimento Portland

O cimento apresenta alguns elementos indesejáveis, tais como (METHA e MONTEIRO, 1994):

- Óxido de Cálcio (CaO);
- Óxido de Magnésio (MgO);
- Óxido de Sódio (Na_2O);
- Óxido de Potássio (K_2O);
- Óxido de Ferro (Fe_2O_3);
- Óxido Ferroso (FeO);
- Óxidos de estanho (SnO);
- Óxido de chumbo (PbO);
- Óxido de Titânio (TiO_2);
- Halogenetos e
- Fosfatos.

É importante dizer que os óxidos de cálcio e de magnésio dão origem a reações expansivas por fixação de água (perigosas se ocorrerem depois do endurecimento). Nos cimentos comerciais aparecem sempre como impurezas o óxido de magnésio (MgO) proveniente da dolomita que aparece como impureza nas rochas calcárias e o óxido de cálcio (CaO - quase inexistente nos cimentos modernos). O teor de periclásio (forma cristalina do óxido de magnésio) deve ser restringido, pois sua hidratação é uma reação lenta e expansiva. Já o óxido de magnésio na forma não cristalina não provoca expansão prejudicial.

O alto teor de MgO (magnésia) causa desvantagens na hidratação do cimento:



Segundo ALI e MULLICK (1998), a hidratação do MgO provoca o aumento do volume e produz sais solúveis que enfraquecem o concreto quando exposto à lixiviação. A magnésia, que parece permanecer livre durante todo processo de calcinação, está usualmente presente em teores de 2 a 3%, limitados pelas especificações a um máximo aconselhável de 5%. Entretanto, no Brasil, esse limite chega a 6,5%.

3.1.5. Hidratação do Cimento Portland

O enrijecimento da pasta é caracterizado inicialmente pela hidratação dos aluminatos e a evolução da resistência (endurecimento) é realizada pelos silicatos. Os produtos de hidratação do cimento são muito pouco solúveis na água (RIGO, 1998 - METHA e MONTEIRO, 1994 – NEVILLE, 1997).

a) Hidratação dos Aluminatos.

A reação do C₃A com água é imediata e por isto há a necessidade da adição de sulfato (gipsita CaSO₄) para retardar a reação. A hidratação dos aluminatos na presença de sulfato resulta na etringita (C₆AS₃H₃₂) que assumem forma aciculares e em monossulfatos hidratados (C₃A₃S₃H₂₄), com a forma de placas hexagonais delgadas.

A formação das agulhas de etringita começa minutos após o início da hidratação, sendo responsável pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial. Após alguns dias, dependendo da proporção alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita pode tornar-se instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, que é uma forma mais estável (METHA e MONTEIRO, 1994).

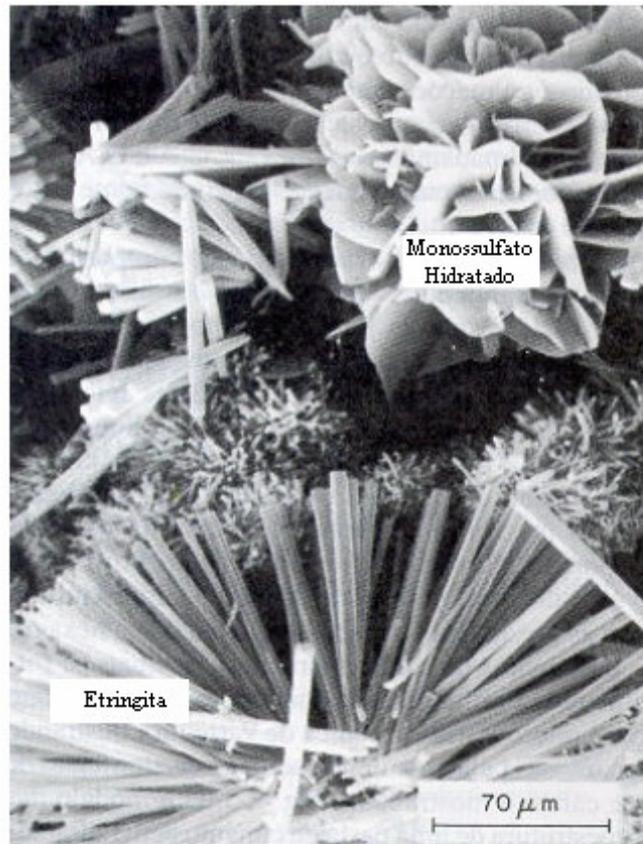


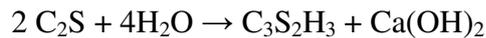
Figura 3.2 - Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita (MEHTA E MONTEIRO, 1994)

b) Hidratação dos Silicatos

A hidratação dos silicatos se dá algumas horas após o início da hidratação do cimento. A hidratação do C_3S (Alita) e do C_2S (Belita) origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H e hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, compostos estes que preenchem o espaço ocupado pela água e pelas partículas do cimento em dissolução.

A reação de hidratação do C_3S resulta em 61% de $C_3S_2H_3$ e 39% de $Ca(OH)_2$ e a C_2S em 82% de $C_3S_2H_3$ e 18% de $Ca(OH)_2$. O C_3S necessita de 24% de água para hidratar e o C_2S apenas 21%.

(NEVILLE, 1997):



Sabendo que o C-S-H contribui mais para a resistência da pasta de cimento que o $Ca(OH)_2$, observamos que um cimento com maior teor de C_3S resultará em um concreto com maior resistência mecânica.

Os compostos resultantes da hidratação do cimento são:

-C-S-H: segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o silicato hidratado de cálcio representa 50% a 60% do volume de sólidos da pasta de cimento completamente hidratada. Estes compostos são os principais responsáveis pela resistência da pasta a esforços mecânicos. A morfologia das placas varia de fibras pouco cristalinas (estrutura amorfa) a uma malha reticulada. Geralmente o C-S-H contém pequenas quantidades de Al, Fe, Mg e outros íons.

- $Ca(OH)_2$: representa 20% a 25% do volume de sólidos da pasta. Sua morfologia é bem definida, formando cristais prismáticos, que aumentam de tamanho à medida que aparecem espaços livres, decorrentes do aumento da relação água/cimento. O hidróxido de cálcio (portlandita) apresenta característica alcalina, sendo portanto responsável pela passivação das armaduras, protegendo-as da corrosão.

-Sulfoaluminatos de cálcio: ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos da pasta hidratada, sendo os principais compostos a etringita e monossulfato de cálcio.

-Vazios: a estrutura de poros se desenvolve durante a hidratação e é influenciada pela relação água/cimento. A resistência mecânica da pasta está fortemente relacionada

com a sua porosidade, pois somente os elementos sólidos resistem a esforços. É aceito que a resistência da argamassa é fundamentalmente uma função da forma e distribuição dos espaços vazios e porosidade. A porosidade da pasta de cimento se distribui da seguinte forma:

- poros de gel ou entre camadas de C-S-H - vazios pequenos (2 a 25 Å) que não influem na resistência da pasta.

- vazios capilares - representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da hidratação do cimento, sendo que estes influenciam um pouco na resistência da pasta de cimento. Segundo NEVILLE (1997), a porosidade capilar da pasta depende tanto da relação água/cimento da mistura como do grau de hidratação. Os poros capilares possuem um tamanho médio, estimado a partir de medição de pressão de vapor como cerca de 1,3µm. Ao decorrer da hidratação acontece um aumento no teor de sólidos da pasta e, nas pastas maduras e densas, os capilares podem ser interrompidos pelo gel, sendo apenas interligados somente por poros de gel.

- Poros de ar incorporado - possuem forma esférica, com dimensões superiores aos vazios capilares. Podem ser devido a uma má vibração do concreto. Devido a suas grandes dimensões reduzem bastante a resistência do concreto e aumentam sua permeabilidade.

Segundo MEHTA E MONTEIRO (1994), os poros de gel de C-H-S (poros dentro do gel de cimento) são muito pequenos para iniciar trincas sob baixos esforços e por isso não prejudicam a resistência da argamassa. Já os poros capilares (poros entre os produtos de hidratação do cimento), entretanto, podem ter alguns milímetros de comprimento e são suficientes para iniciar fissuras, reduzindo, portanto a resistência da argamassa. Apesar disso a distinção entre os poros capilares e os poros gel em relação o diâmetro dos poros não é bem definida, sendo assumido geralmente que os poros de gel possuem diâmetros em torno de 1 a 3 nm e os poros capilares em torno de 10 a 5000nm.

Durante a hidratação do cimento grandes espaços dos poros capilares são preenchidos com os produtos da hidratação do cimento, refinando assim o tamanho destes poros e aumentando o volume de poros gel finos.

3.1.6 Zona de Transição Pasta de Cimento / Agregado

É a porção da pasta de cimento em contato com o agregado. Normalmente ela apresenta características diferentes do restante da pasta, sendo por isso considerado como outra fase.



Figura 3.3 - Representação da Zona de transição Pasta de cimento e Agregado (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A Zona de Transição entre a Pasta e o Agregado (ZTPA) é caracterizada por ser uma região com maior porosidade e heterogeneidade em relação ao restante da pasta. Esta porosidade é devido ao aumento da relação água/cimento na mistura, formando um filme de água em torno do agregado graúdo. Os maiores espaços permitem a formação de grandes cristais de Ca(OH)_2 com seu eixo orientado perpendicular ao agregado, o que cria planos preferenciais de ruptura. Verifica-se também falha na aderência entre a pasta e o agregado, podendo-se relacionar este fato aos grandes cristais formados, com superfície específica menor, que diminui a força de adesão (forças de Van der Waals).



Figura 3.4- Cristais grandes de Portlandita (P) orientados perpendicularmente em relação ao agregado (G) na zona de transição (MORANVILLE E REGOURD, 1992)

Para o concreto convencional a espessura da zona de transição é de aproximadamente 50 μ m (METHA e MONTEIRO,1994). A zona de transição é também considerada o elo fraco do conjunto, estando sujeita a microfissuração com maior facilidade, bastando pequenos acréscimos de carregamento e de variações de volume e umidade.

MONTEIRO (1985) mostra em seu trabalho que quando o concreto é carregado nas primeiras idades, as microfissuras tendem a se propagar na zona de transição bastante porosa. Entretanto, com o tempo, a zona de transição é preenchida com produtos da hidratação e as fissuras passam a se propagar pelo filme de hidróxido de cálcio depositado sobre o agregado.

A microestrutura deve ser descrita em termos da microestrutura de poros e o progresso da hidratação. A hidratação na região vizinha do grão de agregado difere devido a relação água/cimento que é alta e por isso o crescimento e a natureza da hidratação deve ser influenciada pela superfície e pela natureza química dos agregados.

Verifica-se também que há uma concentração maior de agulhas finas de etringita na zona de transição, conforme a figura mostra a seguir.

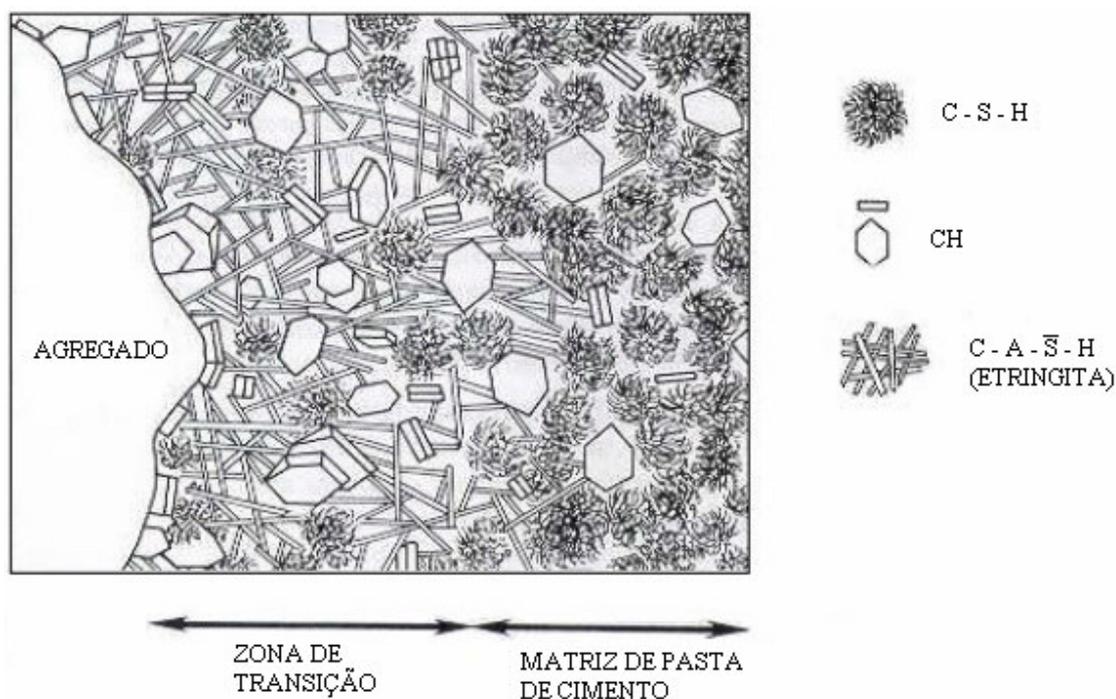


Figura 3.5- Representação esquemática entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA e MONTEIRO,1994)

A quantificação da porosidade da zona de transição entre agregados e pasta de cimento pode ser obtida por dois tipos de técnicas: análise da imagem da superfície polida, observada por MEV através de elétrons retro-espalhados, e a porosimetria de mercúrio. A primeira técnica trará dados locais, enquanto que a segunda mostra informações do volume. As observações feitas nas seções de argamassas ou de concretos possibilitam determinar a porosidade em função da distancia da superfície do agregado.

Segundo DAL MOLIN (1995), a porosidade é mais próxima à superfície das partículas de agregados. O tipo de variação na porosidade ocorre nos primeiros 15 a 20 μ m. Quando usado a adição mineral sílica ativa e superplastificantes, a porosidade é aproximadamente constante porque o baixo empacotamento dos grãos de cimento na ZTPA é melhor preenchido pelas pequenas partículas de sílica ativa. A variação da

porosidade diminui com a idade devido aos produtos de hidratação que preenchem os vazios.

3.1.7 Propriedades do Concreto no Estado Fresco

PETRUCCI (1975) considera como propriedades do concreto fresco a consistência, a textura, a trabalhabilidade, e integridade da massa (oposto de segregação), o poder de retenção de água (oposto de exsudação) e a massa específica.

A trabalhabilidade é uma das mais importantes propriedades do concreto no estado fresco. Definida por vários autores, a trabalhabilidade pode ser entendida como o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco que será lançado nas fôrmas com uma perda mínima de homogeneidade.

Segundo NEVILLE (1997), a trabalhabilidade está relacionada com a energia necessária para vencer os atritos internos entre as partículas. Como o atrito interno é uma propriedade intrínseca da mistura, a trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário para produzir adensamento pleno.

A consistência é um dos principais fatores que influenciam a trabalhabilidade, pois está em função da quantidade de água. A definição de consistência do ACI é: “a mobilidade relativa ou capacidade de fluir do concreto ou argamassa”, sendo esta medida pelo abatimento do tronco de cone.

O principal fator que influencia a trabalhabilidade é o teor de água da mistura, expresso em kg (ou litros) de água por metro cúbico de concreto.

A segregação pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme. Uma das causas para a segregação é a diferença de tamanho das partículas e das massas específicas dos constituintes da mistura. O risco de segregação será diminuído se o concreto não tiver

que ser transportado a grandes distâncias e puder ser transferido diretamente da betoneira para a fôrma.

A exsudação, também chamada de separação de água, é a forma de segregação em que parte da água da mistura tende a subir para a superfície de um concreto recém aplicado. A exsudação é motivada pela maior ou menor impossibilidade que apresentam os materiais constituintes de manter a água de mistura dispersa na massa. A parte superior do concreto, sujeito à exsudação, apresenta-se muito úmida, tendendo a produzir um concreto poroso e menos resistente, estando sujeito à desintegração pela percolação de água. Segundo PETRUCCI (1975), a exsudação pode ser controlada com o uso de misturas ricas, contendo cimentos muito finos e agregados naturais de grãos arredondados, podendo também ser utilizado adições de grãos bem finos, compensando as deficiências dos agregados.

3.1.8 Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

A resistência mecânica, um dos principais parâmetros de projeto, é a capacidade do material em resistir a tensões sem fraturas ou grandes deformações, sendo o concreto o material mais adequado para resistir a esforços de compressão. A resistência do concreto aparece em função do processo de hidratação do cimento, mas como este é relativamente lento, faz com que os ensaios de resistência do concreto sejam geralmente baseados em corpos de prova curados em 28 dias. A resistência à tração e à flexão é da ordem de 10 e 15 %, respectivamente, da resistência à compressão axial. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), é fato conhecido que em sólidos há uma relação inversa entre porosidade e resistência. A resistência está relacionada com a parte sólida da pasta de cimento, sendo que os vazios são prejudiciais à resistência. A resistência mecânica varia na razão inversa da relação água/cimento. Além da resistência mecânica, outros fatores são importantes para o controle do concreto, tais como a distribuição de poros, fissuras e outros.

Os principais fatores que influenciam a resistência mecânica do concreto são:

- relação água/cimento;

- idade;
- forma e graduação dos agregados;
- tipo de cimento;
- forma e dimensão dos corpos de prova;
- velocidade de aplicação da carga de ensaio;
- duração da carga.

As variações de volume dos concretos são o resultado da soma de várias parcelas, tais como a variação do volume dos produtos de hidratação, a variação do volume dos poros internos. Estas deformações são causadas pelas condições ambientais (retração, variações de umidade, variações de temperatura) e ação de cargas externas (deformação imediata e lenta).

Segundo HELENE (1993), a durabilidade é outro aspecto importante nas propriedades do concreto no estado endurecido. A capacidade do concreto de resistir à ação de intempéries, ataques químicos e físicos, mantendo assim suas características originais e desempenhando sua função, é considerado mais um parâmetro para a confecção de estruturas de concreto. Efeitos físicos que influenciam negativamente a durabilidade do concreto incluem o desgaste da superfície, fissuras causadas pela pressão da cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas. Alguns efeitos químicos deletérios como a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas e reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reações álcali-agregado e corrosão das armaduras influenciam a durabilidade do concreto. A água é considerada o agente primário para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto, servindo de veículo para o transporte de íons agressivos através da estrutura porosa do concreto.

De acordo com DIAMOND (2004), a interconexão desses vazios de água ou ar torna o concreto permeável à água. A permeabilidade torna-se uma propriedade para os concretos que expostos ao ar, sofrem os ataques de águas agressivas ou a ação destruidora dos agentes atmosféricos. A absorção é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares. Já a permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem da água através do material. A porosidade se

refere à quantidade total de vazios e a absorção está em função dos poros que tem comunicação com o exterior.

3.2 Patologia do Concreto

As características de durabilidade dos concretos e argamassas devem ser avaliadas com a mesma atenção que as propriedades mecânicas. Os custos de manutenção e recuperação das obras de concreto têm-se tornado cada vez mais elevados em um mercado consumidor a cada dia mais exigente, levando os engenheiros a tomarem consciência dos aspectos de durabilidade, avaliando melhor as implicações econômicas e os impactos causados no meio ambiente. A produção de materiais mais resistentes e duráveis contribui para a não exploração de recursos materiais, preservando a natureza.

Segundo HELENE (1993), a qualidade potencial do concreto depende basicamente do tipo de cimento, da relação água/cimento e do grau de hidratação. São esses os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusibilidade de água ou de gases, de migração de íons, assim como todas as propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão, e outras. As características de menor permeabilidade e menor difusividade iônica das pastas de cimento Portland constituem aspectos favoráveis para a proteção das armaduras. Geralmente, as soluções que saturam os poros da pasta apresentam valores de pH próximos de 12, condições que favorecem a passivação da armadura. Esta passivação cria uma proteção contra a corrosão pela formação de uma película estável de óxido de ferro hidratado. A perda dessa proteção intrínseca ocorre quando a alcalinidade é diminuída ou mesmo sem o abaixamento do pH pela ação de íons agressivos, especialmente os cloretos.

A perda da proteção natural oferecida à armadura pelo cobrimento de concreto pode ocorrer através do mecanismo de despassivação por carbonatação, no qual o gás carbônico da atmosfera penetra por difusão reagindo com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução. A despassivação deletéria

pode ocorrer em ambientes sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, possibilitando a corrosão da armadura. Os produtos expansivos da corrosão criam tensões no revestimento do concreto de cimento portland, resultando em fissuras.

O sistema de poros na pasta de cimento endurecida é fator importante, pois a célula eletroquímica necessita de uma conexão entre o ânodo e o cátodo para estabelecer a corrosão. Em termos elétricos, é a conectividade dos poros que controla a passagem da corrente e assim, a resistividade elétrica do concreto é fortemente influenciada pelo teor de umidade do concreto, pela composição iônica da água dos poros e pela sua conectividade (NEVILLE, 1997). Assim, ao se estabelecer essa conectividade, pode-se caracterizar a atual permeabilidade (uma vez que há variação com o tempo) e com isso inferir sobre o atual estado de corrosão das armaduras das estruturas de concreto armado.

Já a despassivação por elevado teor de íon cloro (cloreto), segundo ALVIM (2002), ocorre através da penetração do cloreto por processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores de cloreto, despassivando a superfície do aço e instalando a corrosão.

A alcalinidade do concreto é característica vantajosa para a proteção das armaduras. O concreto se comporta como um inibidor anódico, uma vez que a película de óxido de ferro depositada sobre o metal dificulta a difusão do oxigênio, impedindo a reação catódica e, por consequência, a corrosão.

Segundo Paulo Helene (1993), os mecanismos mais importantes de envelhecimento e deterioração da estrutura de concreto são a lixiviação, a expansão por águas e solos que contém sulfatos e reação álcali-agregado.

A lixiviação é causada por águas puras e carbônicas agressivas e ácidas, que dissolvem e carregam os compostos hidratados da pasta de cimento, trazendo como consequência uma superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial, eflorescências de carbonato, elevada retenção de fuligem e risco de desenvolvimento de fungos, com consequente redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais.

De acordo com HELENE (1995) a expansão por ação de águas e solos que estejam contaminados com sulfatos, dá origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado, criando fissuras aleatórias, esfoliação e redução significativa da dureza e resistência superficial do concreto, com conseqüente redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais.

O ataque ao cimento por águas sulfatadas pode causar comprometimento da estrutura da obra decorrente da expansão causada pela cristalização da etringita. Quando a pressão de expansão atinge o limite de resistência à tração do concreto, aparecem fissuras que permitem a entrada de agentes deletérios.

Segundo CHAN (2000), a reação álcali-agregado causa a expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos causando variações de volume do concreto. Este fenômeno é devido aos álcalis ativos presentes nas soluções contidas nos poros do concreto que entram em contato com certos tipos de agregados que contêm minerais reativos. A reação se processa de forma lenta e complexa e se manifesta por expansão e conseqüente fissuração, deslocamento e queda da resistência do concreto.

De acordo com SANTOS (1975), os elementos alcalinos do cimento (Na_2O) provêm das matérias primas utilizadas na sua fabricação, principalmente dos feldspatos, micas e minerais argilosos presentes no clínquer sob vários estados de combinação.

A composição mineralógica dos agregados pode influenciar nas reações com os álcalis em três tipos, descritos como álcali-silica (sílica ativa proveniente de minerais (KUPERMAN, 1998)), álcali-silicato (sílica ativa com presença de quartzo tencionado ou não, por processos metamórficos, ou de minerais expansivos da classe dos filossilocatos, como vermiculita, ilita, clorita, e montmorilonita expansiva) e álcali-carbonato (reação da dolomita com a solução alcalina, com conseqüente desdolomitização do calcário e enfraquecimento da ligação pasta-agregado).

A intensidade e velocidade das reações de expansão dependem da natureza e concentração da fase reativa do agregado. O teor de álcalis presente em mistura de concreto é proveniente da composição de: teor de álcalis do cimento, teor de álcalis

disponíveis (ativos) nas soluções dos poros e da quantidade de álcalis, que é incorporada ao concreto por fontes adicionais, como alguns agregados, pozolanas, aditivos e água.

O controle do conteúdo de álcalis por m³ de concreto, o uso de adições ativas (pozolanas e escórias de alto forno), a prática de diluição dos agregados reativos, a limitação da circulação de água no concreto e a execução de um concreto denso, impermeável e com ar incorporado são práticas úteis para proteger a estrutura do concreto.

O mineral reativo tornado pó pode ser usado em diferentes proporções sem causar expansão, podendo até ter efeito pozolânico. As pozolanas exercem influência em todas as reações álcali-agregado. A substituição de parte do cimento por pozolanas em teores superiores a 15% tem mostrado resultados satisfatórios para inibir o processo reativo e expansivo das misturas (SANTOS, 1975).

Segundo MELO NETO (2002) o fenômeno da retração do cimento também influencia na durabilidade do concreto, pois cria tensões internas, gerando fissuras, favorecendo a penetração de agentes agressivos. A retração classificada como plástica ocorre antes do fim de pega, ainda no estado fresco através da evaporação rápida inicial da água de amassamento, pela superfície exposta mistura cimentícia, resultando em fissuração superficial de fácil constatação.

A retração por secagem acontece depois do fim da pega do cimento e ocorre devido à redução dimensional causada pela evaporação da água do poro da mistura. Outro tipo de retração é a química, que ocorre devido à diferença de volume entre o cimento anidro e os produtos da hidratação. Já a retração autógena é definida como a mudança de volume sob temperatura constante, e sem perda de umidade da mistura cimentícia para o meio ambiente causada pela redução da umidade relativa no interior dos poros em decorrência da evolução da hidratação do cimento (POWERS, 1968). Sendo a reação entre o cimento e a água exotérmica, gerando calor e o liberando para o ambiente ou

acumulando. No segundo caso, ocorrerá uma expansão térmica responsável por sérios danos às estruturas.

3.3.1 Adições Minerais Usadas em Concretos

As adições minerais influenciam na resistência e na porosidade. A resistência da pasta de cimento Portland depende da porosidade, da distribuição do tamanho dos poros e da forma desses poros.

Adições minerais tais como cinzas volantes, escória e filler calcário influenciam no tamanho dos poros e na sua distribuição e conseqüentemente na resistência do concreto.

Fatores tais como a finura, a relação água e cimento, temperatura de cura e a alcalinidade das soluções nos poros devem ser examinados com bastante cuidado para melhor explicar a reatividade desse material e sua atividade pozolânica com a evolução do processo de hidratação. O uso de adições minerais no concreto tem melhorado o seu desempenho no estado fresco e endurecido.

Alguns materiais pétreos minerais, que adicionados ao concreto, durante seu preparo, modificam suas características físicas e mecânicas, podendo ser classificados de materiais pulverulentos (BAUER,1995). Materiais pulverulentos podem ser inertes, cimentantes e pozolantes.

Os materiais inertes são materiais pouco ou nada reativos quimicamente, tais como o quartzo. O uso desses materiais em concretos está relacionado com suas próprias características de finura e da forma das partículas do agregado miúdo. Em concretos pobres e sem partículas que passam na peneira 200 mesh (75 μ m) o emprego de materiais pulverulentos provoca a diminuição da exsudação e da segregação, conseqüentemente melhora a trabalhabilidade da pasta. Já em concretos ricos ou com maior número de agregados finos, a adição do material inerte fino piora a trabalhabilidade do concreto. Esses materiais podem ser usados com a finalidade de reduzir a retração e a conseqüente formação de fissuras.

Os materiais inertes podem ser empregados na proporção de 5 a 15% da massa do cimento, diminuindo o preço por volume de concreto produzido.

Os materiais cimentantes são os cimentos naturais de alto-forno, os cimentos pobres e a cal hidráulica. Esses materiais reduzem o calor de hidratação do concreto (BAUER,1995).

Segundo Bauer (1995), as pozolanas são materiais que não possuem propriedades cimentantes, entretanto quando finamente moídos e na presença de umidade, reagem quimicamente com a cal, formando compostos que tem propriedades cimentantes.

São considerados pozolanas as cinzas vulcânicas soltas ou compactas, rochas ígneas, rochas silicosas sedimentares (terras diatomáceas, argilas), argilas calcinadas e subprodutos industriais (escória de alto-forno, cinzas volantes).

Segundo NEVILLE (1997), algumas pozolanas naturais têm suas atividades melhoradas por calcinação a temperaturas entre 550°C e 1100°C, dependendo do material.

3.3.2 Adições Mineraias como Material de Preenchimento

Adições mineraias inertes, também conhecidas como fílers, são agregados muito finos, compreendidos entre 5 a 75 μm . Segundo NEVILLE (1997), um fíler é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, devido as suas propriedades físicas, melhora as propriedades do concreto, como trabalhabilidade, densidade, segregação, permeabilidade, capilaridade, exsudação ou tendência à fissuração.

Segundo GRIGOLI e HELENE (2001), as partículas muito finas ou moídas, que apresentam diâmetro médio de 5 a 50 μm , podem ser classificadas como adição fíler, e contribuem para um melhoramento da matriz cimentícia, para um maior preenchimento dos vazios deixados pelos produtos de hidratação do cimento ou pela não hidratação do

cimento. Já o agregado fíler são partículas finas, que apresentam diâmetro médio entre 50 e 150 μm , contribuindo para o preenchimento dos vazios deixados pela descontinuidade da curva granulométrica do agregado miúdo, que surgem da não completa densificação dos agregados com a pasta de cimento.

Dentre os fílers mais utilizados, encontram-se o material carbonático, o pó de quartzo e o pó de pedra.

Na adição, o efeito físico dos grãos finos permite um melhor empacotamento com as partículas de cimento e reduzem a porosidade na zona de transição entre a pasta e o agregado.

Em geral, o efeito pozolânico não depende apenas da reação pozolânica, mas também do efeito físico ou de preenchimento de pequenas partículas na mistura. A ação física da pozolana melhora a densidade, a homogeneidade da pasta. Segundo KIHARA (1986), a substituição de 15% de massa de cimento por sílica ativa adicionará aproximadamente 2.000.000 partículas para cada grão de cimento substituído, preenchendo os vazios com produtos da hidratação mais resistentes, melhorando a ligação com os agregados.

MEHTA (1985) apresentou em seu trabalho que a adição de cinza volante ou cinza de casca de arroz, que possuem partículas mais finas que o cimento Portland, causa a segmentação dos poros grandes e aumenta o número de regiões onde ocorre a nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações e formando menos cristais de hidróxido de cálcio (CH). A ação química dos materiais com propriedades pozolânicas aumentam o efeito físico por causa da alta segmentação dos poros e o refinamento dos grãos de CH durante o processo de cura.

GRIGOLI e HELENE (2001) estudaram o comportamento das adições minerais inertes em poros e na zona de transição em concretos, na forma de quartzo finamente moído, na finura de 2500 cm^2/g . O material quartzoso moído utilizado, apresenta grãos irregulares, angulosos, com textura superficial lisa e vítrea. Esse material quartzoso proposto como

adição mineral inerte, tem tamanho médio dos grãos da ordem de $30\mu\text{m}$, para $2500\text{cm}^2/\text{g}$ e superfície polida e vítrea, mostrado na figura 3.1.

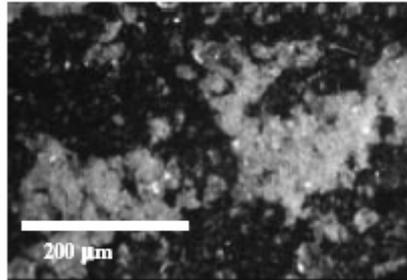


Figura 3.6 – Grãos de Quartzo moído (GRIGOLI e HELENE (2001))

Foram obtidos abatimentos de tronco de cone de 75mm para o concreto com 0% de adição inerte e 90mm para o concreto com 20% de adições inertes. A resistência à compressão axial aumentou de 48,8 MPa no concreto com 0% de adição inerte, para 53,1 MPa no concreto com 20% de adição inerte, mantendo-se a mesma relação água/cimento e o mesmo fator m (massa seca). Os concretos que foram produzidos com uma relação água/cimento pequena possuem capilares de menor diâmetro e menos intercomunicáveis, diminuindo assim a água absorvida. O refinamento de poros da pasta causa um aumento na altura da ascensão capilar e da absorção capilar. O aumento da altura da ascensão capilar é devido ao menor diâmetro dos poros, trazendo maiores pressões capilares. A obstrução do poro capilar por grãos de quartzo moído, sendo colmatado por grãos menores e produtos de hidratação, é apresentada na figura 3.6 abaixo. Esta presença de grãos de quartzo no interior do capilar indica encaminhamento preferencial destes grãos a lugares no interior do concreto onde haja maior concentração de água quando do estado fresco.

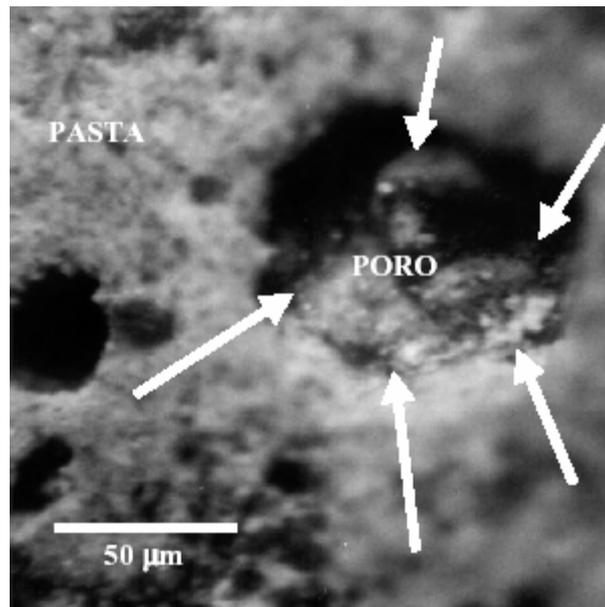


Figura 3.7 – Obstrução de poro por adição inerte em concreto de 20%. (GRIGOLI e HELENE, (2001))

Os grãos de agregados com superfície vítrea e polida, segundo POPOVICS (1979), NEVILLE (1997), têm efeito plastificante, melhorando a trabalhabilidade de argamassas e concretos. A superfície da partícula polida e vítrea favorece o efeito da ação da tensão capilar facilitando, portanto o deslocamento das partículas uma em relação às outras e com o restante dos agregados e pasta presentes no concreto.

Segundo NEVILLE (1997), as partículas silicosas com superfícies polidas e vítreas, quando no preparo da argamassa ou do concreto, manifestam forças capilares, criando uma película de água em torno dos agregados facilitando o deslocamento de uma partícula em relação a outra.

Os produtos da hidratação do cimento: silicatos de cálcio hidratado, monosulfoaluminatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados hexagonais possuem a capacidade de aderir fortemente em outros sólidos com superfície específica maior, tais como o hidróxido de cálcio, os grãos de clínquer anidro, e as partículas de agregados. Isso acontece, pois estes produtos possuem grande área específica e capacidade de adesão muito elevada. (GRIGOLI e HELENE,(2001)).

A presença de partículas inertes na zona de transição do concreto nas primeiras idades desorienta a formação preferencial do hidróxido de cálcio, dificultando, portanto, a formação de planos de fraturas contíguos, que enfraquecem o concreto ou argamassa na zona de transição e no resto da pasta de cimento (OLLIVIER, 1998).

A importância dos poros não intercomunicáveis está relacionada com a não penetração do CO₂ e dos íons cloreto, permitindo materiais cimentícios duráveis frente a estes dois agentes agressivos.

MEHTA (1994) observa que a sílica ativa atua apenas como material inerte ou de preenchimento nos primeiros estágios da aplicação do concreto ou argamassa, ajudando a densificar a matriz da pasta e depois reage como material com propriedades pozolânicas. A adição da cinza de casca de arroz, sendo este uma partícula menor que a do cimento, causa a segmentação dos grandes poros da argamassa e aumenta o número de pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação da pasta de cimento, acelerando a reação e formando cristais menores de portlandita.

O estudo da microestrutura do concreto e do uso de adições de materiais inertes é justificado pelos grandes benefícios que se pode obter no controle da porosidade, das fissuras por retração autógena, da resistência mecânica e outros.

3.3.3 Adições Minerais com Atividade Pozolânica

As pozolanas são definidas como substâncias constituídas de sílica e alumina que combinam com o hidróxido de cálcio na presença de água e com os diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes.

Uma definição mais formal da ASTM 618-94a descreve a pozolana como um material silicoso ou sílico-aluminoso que sozinho possui pouco ou nenhum valor cimentício, entretanto quando dividido finamente e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com

propriedades cimentícias. É importante que este material esteja finamente moído para que a sílica possa combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar silicatos estáveis. A sílica deve estar no estado amorfo, isto é vítreo, pois quando apresenta estrutura cristalina sua reatividade é muito pequena. O teor de sílica vítrea pode ser determinado por difração de raios x ou por dissolução em ácido clorídrico e hidróxido de potássio.

A norma brasileira NBR 12653 (1992) classifica as pozolanas, em classes, de acordo com sua origem como na tabela a seguir.

Tabela 3.1 – Classificação das pozolanas estabelecidas pela NBR 12653

NBR 12653	Materiais que Obedecem os Requisitos
Classe N	Pozolanas naturais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas
Classe C	Cinza volante proveniente da queima de carvão betuminoso
Classe E	Os materiais que diferem das classes anteriores e a cinza volante proveniente da queima de carvão sub-betuminoso

Para que o material seja aceito como pozolana, a norma brasileira NBR 12653 estabelece exigências mínimas quanto à sua composição. A tabela mostra algumas propriedades.

Tabela 3.2 – Propriedades químicas – NBR 12653

Propriedade	NBR 12653		
	N	C	E
Classe			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% mínimo)	70,0	70,0	50,0
SO ₃ (% máximo)	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade (% máximo)	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo (% máximo)	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponível em Na ₂ O (% máximo)	1,5	1,5	1,5

Diversos estudos foram e estão sendo realizados com diversas adições minerais em concretos. O uso de adições minerais também melhora a resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, reduz a permeabilidade por refinamento dos poros, e contribui para uma durabilidade maior a ataques químicos, tais como águas sulfatadas e expansão álcali-agregado.

Segundo GUEDERT (1989), as pozolanas usadas como adição ao cimento, conferem aos concretos e às argamassas menor calor de hidratação, pois a pozolana diminui a velocidade inicial de hidratação do cimento, reduzindo a liberação de seu calor de hidratação

A reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e a sílica, resultando em silicato de cálcio hidratado, pode ser expressa de acordo a reação abaixo (MEHTA E MONTEIRO,1994):



CH – hidróxido de cálcio; H = H₂O - água; C-S-H – silicato de cálcio hidratado

As pozolanas classificadas como naturais são materiais possuindo atividade pozolânica no estado natural, ou que podem ser facilmente convertidos em pozolanas, como cinzas e tufos vulcânicos, que quando misturados com cal extinta, produzem cimentos utilizáveis como argamassa e concretos que duram até os dias de hoje (MIELENZ,1949). Já as pozolanas artificiais são argilas de qualquer tipo submetidas a altas temperaturas para desidratação, porém, em temperaturas abaixo do início da fusão. São conhecidos também como materiais pozolanicos os subprodutos industriais tais como as cinzas volantes, a cinza de casca de arroz, a sílica ativa, entre outros (MEHTA e MONTEIRO,1994; NEVILLE, 1997).

Segundo NEVILLE (1997), os gregos e romanos já usavam calcário calcinado e misturando com cal, água, areia, pedra fragmentada e tijolos de argila em cacos. Como a argamassa de cal não endurecia embaixo d'água, os romanos trituravam cal conjuntamente com cinzas vulcânicas ou telhas de barro cozido e finamente triturado. A

sílica ativa e a alumina das cinzas reagem com a cal produzindo o que hoje se conhece como cimento pozolânico.

As adições artificiais são geradas em processos nos quais os materiais se submetem a temperaturas que variam entre 500 e 900 °C, alterando a estrutura cristalina (criação da instabilidade da estrutura interna dos minerais argilosos) e causando um rearranjo de maneira que fiquem instáveis energeticamente. Este procedimento ajuda a aumentar a porosidade das partículas e, assim, sua superfície ativa. Entretanto, a temperatura de queima das argilas deve ser inferior à de fusão. Através da difração de raios X, pode-se observar que as adições artificiais pozolânicas possuem estrutura amorfa, pois o espectograma não apresenta picos característicos de planos cristalinos nos ângulos de difrações.

As pozolanas naturais na forma de terra calcinada misturada com cal têm sido muito usadas para produzir materiais cimentícios a mil anos. O potencial de utilização de resíduo de tijolos de argila como substituição de parte do cimento na argamassa e no concreto tem sido examinado em vários estudos. A utilização de argila calcinada na forma de metacaulim como uma adição pozolânica no concreto tem melhorado a resistência e durabilidade do material.

Segundo SABIR e WILD (2001) o metacaulim é processado pela calcinação do caulim argila sob temperaturas moderadas em torno de 650 a 800⁰C. Esse material contém sílica e alumina na forma ativa que reage com a portlandita. Na adição, dependendo da temperatura de calcinação e o tipo de argila, é também possível alcançar melhor desempenho na resistência e durabilidade, particularmente durante estágios recentes de cura. O aumento da resistência inicial pode ser explicado pela combinação do efeito de preenchimento e aceleração da hidratação do cimento. A argila é mais reativa quando a temperatura de calcinação leva para a perda de hidroxilas, resultando em colapso e em desarranjo da estrutura da argila, tornando-a instável e conseqüentemente mais ativa. Esta temperatura é usualmente encontrada em torno de 600 a 800⁰C. Acima de 850⁰C ocorre a cristalização e o declínio da reatividade.

A maioria das argilas, com as quais se fabricam blocos cerâmicos, em estado natural possui pequena atividade pozolânica, porém quando calcinada a uma temperatura da ordem de 700 a 900°C, torna-se reativa. O tratamento térmico modifica a estrutura cristalina da argila e a transforma em uma estrutura sílico-aluminosa amorfa. Este material, quando moído em partículas muito finas, apresenta composição físico-química dentro das especificadas pela ASTM 618 (ASTM, 1992) para uso como adição mineral em misturas com cimento Portland.

Segundo BENSTED e MUNN (2000), o tratamento a quente da argila (feldspatos e quartzo) queimada sob temperaturas de $1100 \pm 1200^\circ\text{C}$ para produzir a telha cerâmica, destrói a atual estrutura cristalina dos minerais argilosos para formar essencialmente uma estrutura desordenada ou amorfa de alumino-silicato, talvez com alguma ligação cerâmica presente.

O tempo de duração para a calcinação da argila está em torno de 1 hora, sendo também aquecido a um período de 2 horas. O tempo de permanência a temperaturas de 1100°C a 1200°C é muito pequeno. Partículas são sinterizadas com uma fase líquida, sendo esta um tipo de sílica de fase vítrea. De acordo com a difração de raios X, foram determinadas fases cristalinas (quartzo e algumas vezes mulita), alumino-silicatos, e fases amorfas.

Os resultados experimentais apresentados por BENSTED e MUNN (2000) indicam que o resíduo de telha cerâmica possui propriedades pozolânicas e pode ser empregado na produção de concreto de cimento Portland

MEHTA (1992) desenvolveu uma fornalha com capacidade de controlar as condições de tempo e temperatura da queima da casca de arroz para que a sílica permaneça em estado amorfo e com elevada superfície específica, produzindo uma cinza de altíssima reatividade, porém com elevado teor de carbono. A casca de arroz é constituída de quatro camadas fibrosas, esponjosas ou celulares, que são altamente silicosas. Experimentos foram realizados na Universidade da Califórnia (MEHTA, 1992), obtendo as condições ótimas de queima para produção de cinzas com reatividade

pozolânica. A temperatura de queima situa-se na faixa de 500 a 700°C, e em temperaturas entre 700 e 800°C quando o tempo de combustão é menor que 1 minuto. A sílica residual é mantida como fase amorfa e com porosidade interna da ordem de 50 a 100 m²/g de superfície medida através de adsorção de nitrogênio. MEHTA conclui em seus trabalhos que para não haver cristalização da sílica as temperaturas deveriam situar-se entre 500 e 700°C. A sílica cristalina na pressão atmosférica aparece na forma de quartzo α , quartzo β , tridimita e cristobalita. A forma mais estável na temperatura ambiente é o quartzo α . O quartzo α transforma-se em quartzo β à 573°C e permanece estável até 870°C. Entre 870°C e 1470°C persiste a forma tridimita e de 1470°C até 1713°C ela se modifica para a cristobalita. . Acima de 1713°C ocorre a fusão da sílica.

Algumas pozolanas inibem ou impedem a reação álcali-agregado no concreto, possuindo estas propriedades por serem capazes de reagir ou adsorver os álcalis liberados pelo cimento. Os álcalis (usualmente expressos por K₂O e Na₂O) assim ligados à pozolana não devem mais atacar (agregados contendo, por exemplo, opala, vidros vulcânicos ou calcedônia).

Segundo MIELENZ, (1951), as pozolanas naturais devem sua atividade química a uma ou mais das cinco seguintes substâncias ou compostos: vidro vulcânico, opala, argilominerais, zeólitas e hidróxidos de alumínio. Considera-se que a atividade pozolânica é tanto maior quanto maior o teor de sílica amorfa. Os materiais pozolânicos naturais são geralmente rochas piroclásticas, ricas em sílica ou sedimentos ricos em sílica que são mais ou menos estratificados, o que leva a variações em composição química e mineralógica, em textura e outras características.

De acordo com SANTOS (1975), as argilas e os folhelhos argilosos calcinados têm sido usados como pozolanas desde os tempos dos romanos. As argilas utilizáveis podem ser caulínicas ou montmoriloníticas, entretanto também são utilizados argilo-minerais menos comuns, como paligorsquita. As propriedades pozolânicas são desenvolvidas por calcinação a cerca de 500°C, sendo as temperaturas ótimas entre 700°C e 900°C. A atividade pozolânica é reduzida por calcinação em temperaturas mais elevadas e

tornam-se praticamente inativas em temperaturas de 900°C a 1000°C, devido à formação de compostos cristalinos sem atividade pozolânica.

As variações da atividade pozolânica de argilas, em função da temperatura, estão correlacionadas com as variações estruturais que ocorrem nos diferentes argilo-minerais. Essas transformações são esquematicamente representadas no estudo de GRIM (1963), no qual as transformações que ocorrem com a temperatura no argilo-mineral caulinita (argilo-mineral mais freqüente e constituinte essencial da maior parte das argilas brasileiras utilizadas na fabricação de tijolos de alvenaria, telha e cerâmicas para revestimento) são as seguintes:

$3 (\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 400^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C} \rightarrow 6 \text{H}_2\text{O} + 3 (\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2)$ (metacaulim ou metacaulinita) + 975 °C nucleação de mulita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) + 4SiO₂ + 1225 °C → cristalização completa da mulita.

Entre 500°C e 800°C forma-se a fase metacaulinítica, contendo alumina e sílica de elevado grau de desordem cristalina (elevada área específica e grande atividade química) e que acima de 900°C há formação de compostos cristalinos estáveis, de menor área específica.

COSIN (2004), apresentou em seu trabalho a caracterização por difração de raios X das fases cristalinas formadas durante o aquecimento entre temperaturas de 300°C e 1250°C de argilas usadas como matéria-prima para a fabricação de pisos de cerâmica vermelha. Os argilominerais componentes da mistura sofreram transformações térmicas independentes entre si até cerca de 800°C. A partir de 900°C, essas fases interagem entre si formando novas fases cristalinas contribuindo à fase vítrea. No intervalo entre 800°C a 900°C ocorreram mudanças estruturais muito grandes com formação considerável de fase vítrea. Após alcançar a temperatura de 1000°C foram observadas as seguintes fases cristalinas: mulita e quartzo. Após a queima a 1100°C foram observadas a mulita, forsterita, quartzo e hematita e após 1200°C as fases mulita, forsterita ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$), espinélio ferrífero, quartzo e hematita. Na faixa de 800°C a 900°C a metacaulinita, os anidridos da nontronita e da ilita se decomposeram, ambos formando

silicatos cristalinos e gerando uma fase vítrea com os cátions formadores de vidro que estavam disponíveis no sistema. A argila queimada a 1100°C apresenta intensa banda da fase vítrea. Após a queima a 1250°C as fases cristalinas continuam basicamente as mesmas, não sendo caracterizada a formação de cristobalita.

É importante observar que as propriedades da argamassa e dos concretos contendo pozolanas preparadas a partir de argilas variam bastante em função da composição química e mineralógica dessas matérias-primas e do tratamento térmico e do processamento a que a pozolana foi submetida antes do uso.

3.3.4 Análise da Atividade Pozolânica

No Brasil, a atividade de uma pozolana é determinada pelo índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752, ABNT 1992) ou com cal (NBR 5751, ABNT 1992). A determinação do índice de atividade pozolânica consiste na comparação entre duas argamassas, uma de referência (sem adição de pozolana) e uma outra com a substituição de 35% do volume do cimento ou da cal pela suposta pozolana. O índice de atividade é a relação entre a resistência à compressão axial aos 28 dias da argamassa com e sem pozolana.

$$\text{IAP} (\%) = \frac{f_{c_{28}CP}}{f_{c_{28}SP}}$$

Sendo: IAP = Índice de Atividade Pozolânica (%), $f_{c_{28}CP}$ = resistência à compressão axial aos 28 dias com pozolana e $f_{c_{28}SP}$ = resistência à compressão axial aos 28 dias sem pozolana.

Pode ser verificada também através da determinação da pozolanicidade baseada no método químico de determinação da pozolanicidade de cimento pozolânico, conforme a NBR 5753 (ABNT, 1991), conhecido também com Método de Fratini.

HAMASSAKI (1997) estudou traços diferentes de argamassa, com adição de resíduos de blocos cerâmicos, tijolos e blocos de concreto separadamente, avaliando o índice de

atividade pozolânica desses materiais através do ensaio de Chapelle modificado, obtendo como resultado, pelo difratograma de raios x, a quantidade de CaO da amostra que foi consumida.

Tabela 3.3 – Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chapelle modificado de agregados reciclados de resíduos de materiais de demolição

Material	Consumo de CaO (mg de CaO/g de amostra)
Bloco cerâmico	137,1
Tijolo	255,8
Bloco de concreto	53,6

HAMASSAKI, 1997

Para que o material seja considerado pozolânico neste método, é necessário que ele apresente um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g. Através dos ensaios de pozolanicidade feito por HAMASSAKI, podemos constatar que o bloco cerâmico e o tijolo não apresentaram um consumo de CaO/g suficiente para serem considerados como pozolanas. Entretanto, pode-se observar que o consumo de CaO/g desses materiais foi consideravelmente maior do que o resíduo de bloco cerâmico, havendo assim alguma atividade pozolânica, ainda que pequena, provocado pelo resíduo do bloco cerâmico e o tijolo.

WINKLER e MUELLER (1998) realizaram estudos com pó de tijolos cerâmicos adicionados ao cimento. Segundo WINKLER e MUELLER (1998), os tijolos com uma fase vítrea solúvel reagem com Ca(OH)_2 formando C-S-H. Essa fase vítrea é encontrada em tijolos cerâmicos queimados a temperaturas acima de 950°C, entretanto em alguns casos, pode ser encontrada em tijolos queimados a baixas temperaturas, podendo apresentar metacaulim altamente reativo (Al_2O_3 , SiO_2) numa forma instável.

A influência de tijolos queimados e outros materiais cerâmicos onde a matéria prima principal é a argila, a baixas e a altas temperaturas, é muito importante para as características pozolânicas do resíduo. Todos os materiais devem ser moídos em partículas com a mesma finura (ou mais fino) do cimento e adicionados às misturas em teores que variaram de 0 a 60 %. A atividade pozolânica pode ser analisada em função

do consumo de Ca(OH)_2 , medida através da difração de raio X, em amostras retiradas aos 28, 91 e 180 dias.

Tabela 3.4 - Teor de Ca(OH)_2 nas argamassas (avaliação semi-quantitativa):

Tipo de material	Teor de material(%)	Teor de Ca(OH)_2		
		Idade (dias)		
		28	90	180
LB I	10	+++	++++	+++
	20	+++	+++	+++
	30	+++	+++	++
	40	+++	++	+
	60	++	+	+
HBI	20	++++	+++	+++
	40	+++	++	++
	60	+	+	+
Referencia	-	++++	++++	+++

+ = Teor muito baixo

++++ = Teor mais alto

LBI = tijolos queimados a baixas temperaturas

HBI = tijolos queimados a altas temperaturas

WINKLER e MUELLER, 1998

Para alguns alumino-silicatos, a atividade pozolânica pode ser obtida por tratamento à quente tais como a conversão da argila caulinítica (baixa atividade pozolânica) para o metacaulim (alta atividade pozolânica) sobre temperaturas de 700 a 800°C. Outras pozolanas são produzidas pelo aquecimento de alumino-silicatos através de altas temperaturas (>1000°C) sendo neste caso um material de fase vítrea amorfa. Alguns trabalhos foram realizados com a adição de tijolos moídos em argamassas de cimento Portland. Os tijolos são produzidos pela calcinação de argilas ricas em alumino-silicato, e demonstram, quando moídos e aquecidos a temperaturas entre 1000 a 1100°C, atividade pozolânica (O'FARRELL, 2000).

3.4 Efeito das Adições Mineraias nas Propriedades do Concreto no Estado Fresco

3.4.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade define a capacidade e facilidade com que os concretos são lançados e moldados. Segundo METHA e MONTEIRO (1994), a trabalhabilidade representa características do concreto fresco e é de difícil avaliação quantitativa. Esta propriedade está completamente relacionada com a consistência, coesão, exsudação e segregação.

A ASTM C 125-93 define a trabalhabilidade como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto recém-misturado com uma perda mínima de homogeneidade.

A consistência também descreve o estado do concreto fresco, se referindo a facilidade com que o material flui, move-se ou é bombeado, onde o uso de concreto usinado está cada vez mais sendo utilizado e com isso surge a necessidade de bombear o material em edifícios altos.

A consistência, coesão e segregação dependem do efeito sinérgico entre a relação água e cimento, o teor de finos e da continuidade da granulometria do agregado miúdo e graúdo na mistura. A incorporação de adições mineraias tende a aumentar a coesão.

A trabalhabilidade do concreto é de grande interesse, pois possibilita um maior adensamento com uma quantidade razoável de energia, segundo NEVILLE (1997), diminuindo o índice de vazios decorrentes do lançamento do concreto na forma. A presença de vazios diminui muito a resistência: 5% de vazios podem reduzir a resistência de até 30 %. Os vazios no concreto são decorrentes de bolhas de ar aprisionado ou espaços deixados depois de retirado o excesso de água. O principal fator que influencia na trabalhabilidade é o teor de água da mistura.

A segregação pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme (NEVILLE, 1997). A

exsudação é uma forma de segregação em que uma parte da água da mistura tende a subir para a superfície de um concreto recém-aplicado. A incorporação de adições minerais aumenta a viscosidade do concreto no estado fresco, opondo-se ao movimento descendente das partículas mais pesadas e ascendente da água, reduzindo, desta forma, a exsudação.

As adições minerais exercem grandes influências nestas propriedades, devido às características físicas e à reatividade química de algumas pozolanas. A alta finura das adições, quando incorporadas aos concretos, reduzem o tamanho e o volume de vazios, dando uma melhoria na coesão, diminuindo a segregação e exsudação. As pozolanas aumentam a plasticidade do concreto no estado fresco e diminuem a exsudação e a segregação (KYHARA, 1986).

De acordo com NEVILLE (1997), as cinzas volantes, como materiais pozolânicos no concreto, melhoram a trabalhabilidade, diminuem o calor de hidratação e o custo do concreto, e aumentam a resistência ao ataque químico por sulfato e reações álcali-agregado, diminuindo a retração e a porosidade e proporcionando maior resistência ao concreto nas idades avançadas.

3.4.2 Hidratação

Pode-se destacar a influência das adições minerais na confecção dos concretos, identificando os produtos de hidratação gerados nas misturas onde ocorrem reações pozolânicas.

Segundo NEVILLE (1997), a velocidade de hidratação decresce continuamente, permanecendo após algum tempo grãos de cimento anidro. A evolução da hidratação do cimento pode ser determinada através do controle da quantidade de Ca(OH)_2 na pasta, do calor desenvolvido no processo, da massa específica da pasta, da quantidade de água quimicamente combinada e a quantidade de cimento não hidratado presente, através da difração de raios x, técnicas termogravimétricas e estudo das imagens de elétrons retro-espalhados (primários) em um microscópio eletrônico de varredura.

O calor de hidratação é a quantidade de calor, em calorias por grama, que é desprendida durante as reações de hidratação dos compostos do cimento. Sendo a condutividade térmica do concreto muito baixa, observa-se em obras de grande volume de concreto a liberação de quantidade suficiente de calor para gerar fissuras. O uso de cimento com baixo calor de hidratação evita essas fissuras de origem térmica. A quantidade de calor de hidratação depende, entre outros fatores, do tipo de cimento, da sua finura, da temperatura e do tempo de hidratação. Grande parte do calor de hidratação é atribuída aos componentes do cimento Portland alita (C_3S) e belita (C_2S). As pastas de cimento Portland de alto-forno apresentam menor calor de hidratação que as pastas de cimento Portland comum, daí sua aplicação vantajosa em concretos-massa para barragem bem como em galerias, reservatórios, muros de arrimo e estruturas em geral onde possam surgir fissuras de origem térmica que comprometam a durabilidade das obras.

A seguir são apresentados os valores extremos de variação de calor de hidratação de uma série de cimentos industriais brasileiros a 3 e 7 dias, analisados na ABCP. A limitação da idade deve-se ao método adotado (MB-33335) que não leva em consideração o calor desprendido nas idades de 28 dias ou posteriores.

Tabela 3.5 - Calor de hidratação de cimentos industriais brasileiros – 1 cal = 4,29 J

Tipo de Cimento	Calor de Hidratação (J/g)	
	3 dias	7 dias
Comum	223 a 366	258 a 379
Pozolânico	210 a 325	236 a 320
Alto-forno	217 a 250	240 a 290

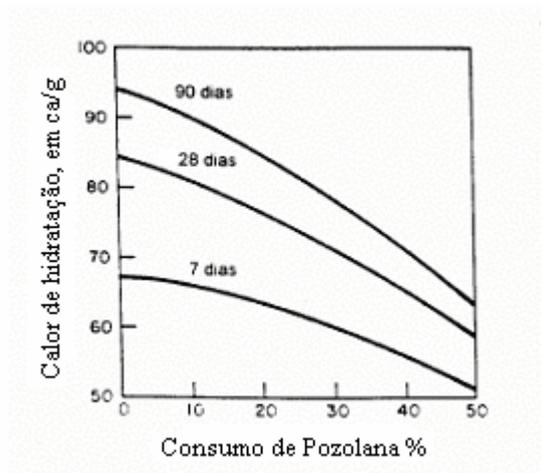


Figura 3.8- Efeito da quantidade de pozolana sobre o calor de hidratação do cimento Portland (MASSAZZA, apud MEHTA, 1994).

As adições minerais podem acelerar o processo de hidratação do cimento Portland quando são constituídas por partículas extremamente finas que atuam como ponto de nucleação para formação do hidróxido de cálcio, e podem também reagir com esse produto de hidratação.

3.4.3 Demanda de água

As adições incorporadas ao concreto podem aumentar a demanda de água para manter a mesma consistência. Isso acontece, pois algumas adições apresentam alto grau de finura e elevada superfície específica. Entretanto, algumas adições melhoram a trabalhabilidade do concreto devido a sua morfologia.

Segundo NEVILLE (1997), um concreto com cinza volante mostra ser mais coesivo e com menor tendência à exsudação. A influência da cinza volante sobre as propriedades do concreto fresco está vinculada à forma das partículas. Muitas delas são esféricas e maciças, mas algumas das maiores são esferas e opacas. A redução da demanda de água é geralmente consequência da forma esférica das partículas de cinza volante observada na figura 3.8, sendo assim caracterizado pelo efeito rolamento. No caso das partículas finas de cinza volante, é observado que estas ficam adsorvidas na superfície de

partículas de cimento devido às cargas elétricas, fazendo com que as partículas de cimento fiquem deflocuradas, diminuindo assim a demanda de água para uma mesma trabalhabilidade. Para uma mesma trabalhabilidade, com o uso de cinzas volantes, observa-se uma redução da demanda de água de 5 a 15% em relação a uma mistura de cimento Portland sem adições.

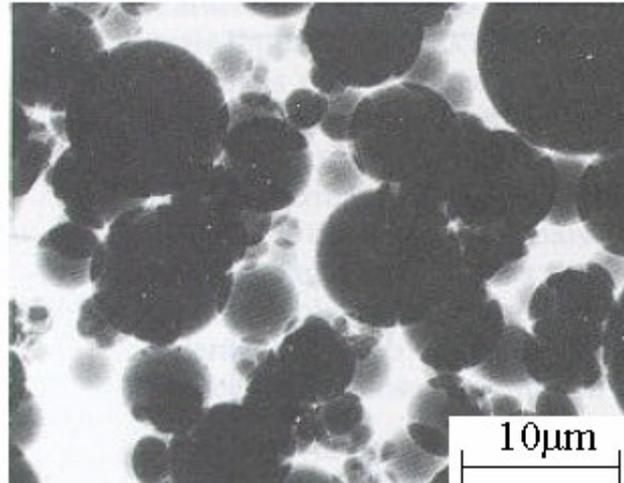


Figura 3.9 – Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante com partículas esféricas e vítreas (MEHTA e MONTEIRO, 1994)

A presença de escória granulada de alto forno melhora a trabalhabilidade e torna a mistura mais móvel, pois a escória causa melhor dispersão das partículas de cimento e possui superfície lisa com baixa absorção de água durante a mistura (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A demanda de água em concretos contendo sílica ativa é cerca de 5% maior, em relação à massa de cimento, do que em concretos sem sílica ativa, devido a sua elevada área específica. A superfície específica da sílica ativa é aproximadamente 20.000 m²/kg. Entretanto, o concreto com sílica ativa é mais coeso, apresentando baixíssima segregação e minimizada exsudação (NEVILLE, 1997).

3.5 Efeito das Adições Mineraias nas Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

A resistência mecânica era a principal preocupação entre engenheiros civis (METHA e MONTEIRO, 1994). Atualmente, a durabilidade dos concretos em cada ambiente também é alvo de pesquisas e é considerado importante nos projetos.

3.5.1 Resistência à compressão axial e resistência à tração

Segundo METHA e MONTEIRO (1994), a resistência do concreto está relacionada com a tensão requerida para causar a fratura, que possui uma relação inversa com a porosidade. Diversos fatores influenciam, como a relação água / cimento, teor de ar incorporado, tipo de cimento, agregados, água de amassamento, aditivos e adições mineraias. Este nível de tensão é fortemente influenciado na zona de transição do concreto. Sabendo que a adesão entre os produtos de hidratação e as partículas de agregado graúdo e miúdo são basicamente formadas por forças eletrônicas de Wan der Walls, pode-se perceber que o volume de porosidade total da pasta de cimento influenciará na resistência do material.

A incorporação de adições mineraias nos concretos, havendo atividade pozolânica, influencia bastante na resistência final, devido à formação de uma maior quantidade de silicato de cálcio hidratado C-S-H, diminuindo a quantidade de Ca(OH)_2 na matriz e da zona de transição (NEVILLE, 1997), contribuindo assim para diminuir a permeabilidade do concreto .

As misturas com adições pozolânicas reduzem a velocidade de desenvolvimento da resistência, porque as reações ocorrem de forma lenta. Porém, devido ao aumento da quantidade de produtos de hidratação, pode reduzir a porosidade da matriz e da zona de transição e causar uma elevação na resistência final do concreto.

3.5.2 Porosidade

A durabilidade de um concreto ou argamassa está diretamente ligada ao comportamento da rede de poros de seu interior. Durante o processo de hidratação, os canais capilares da pasta no estado fresco começam a serem preenchidos pelos produtos de hidratação. Esse processo reduz rapidamente o volume e tamanho dos capilares, não implicando necessariamente na interrupção da sua continuidade. As adições minerais são introduzidas ao concreto, segundo GRIGOLI e HELENE (2001), para diminuir tanto a porosidade, quanto à conectividade entre os poros.

MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que o emprego de adições de sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno, contribuem para o refinamento dos poros, o que provoca uma diminuição do volume de vazios do concreto. É possível estudar o comportamento do concreto com adições minerais através do microscópio eletrônico de varredura e de distribuição de tamanho dos poros, comparando os resultados com concretos sem adição.

Os produtos da hidratação do cimento ao redor das partículas de pozzolana tendem a preencher os vazios capilares grandes com um material microporoso de baixa densidade. Este processo, no qual um sistema, contendo muitos vazios pequenos, é preenchido por produtos de hidratação, é conhecido como refinamento de tamanho de poros (GRIGOLI e HELENE, 2001). A nucleação na pasta de cimento resultante das partículas finas e bem distribuídas de pozzolana terá o efeito de substituir os cristais grandes orientados de hidróxido de cálcio por inúmeros cristais, pequenos e menos orientados. O processo de transformação de um sistema contendo grãos grandes de um componente em um produto contendo grãos menores é o refinamento do tamanho do grão.

WINSLOW e COHEN (1994), afirmam que poros capilares de gels pequenos com diâmetro entre 2,5nm até 10nm, com a perda de 50% das águas em seu interior, provocam retração, e os microporos de gel com diâmetros de 0,5nm a 2,5nm e os

microporos de gel interlamelares com diâmetros inferiores a 0,5nm, provocam retração na forma de deformação lenta, quando perdem água.

A retração pode, segundo HELENE (1989), ser de secagem (hidráulica) ou química devido às reações de hidratação ou de carbonatação podendo dar origem a fissuras indesejáveis.

Para MELO NETO (2002), as causas da retração nos concretos e argamassas são devido a tensões originadas na superfície de separação líquido-gás, nos poros do cimento hidratado com dimensões capilares (pressão de adsorção nas superfícies dos poros do cimento hidratado e ações repulsivas e atrativas entre estas superfícies) e à entrada e saída de água de gel do cimento hidratado.

Para MONTEIRO (1985), em idades iniciais, essas micro fissuras tendem a propagar-se nas regiões de alta porosidade, ou seja, na zona de transição pasta/agregado. Todavia, em idades avançadas, esta região tende a ser preenchida pelos produtos de hidratação e com isso o caminho a ser percorrido pela fratura será através dos cristais originados neste período. Dependendo da mineralogia e planos de clivagem do agregado, tamanho dos cristais e concentração dos produtos de hidratação, a zona de transição pode não ser a região mais fraca.

3.6 Resíduo de Polimento de Porcelanato – RPP

3.6.1 Processo de Fabricação do Porcelanato

O porcelanato é produzido por um processo altamente tecnológico caracterizado por excelentes características técnicas. A composição química das matérias-primas é de grande importância em sua fabricação, principalmente àqueles relacionados com o ciclo de queima. Grês-Porcelanato é um material cerâmico com estrutura compacta, característica de uma fase cristalina imersa em uma fase vítrea.

O porcelanato é conhecido por sua resistência ao desgaste superficial, absorção de água muito pequena, alta resistência mecânica, resistência ao ataque químico, dureza superficial, resistência ao congelamento, resistência à compressão, isolamento a descargas elétricas estáticas e ótimo grau de higiene dos pavimentos.

Segundo RODRIGUEZ e PIANAROS (2004), as matérias-primas cerâmicas utilizadas para a produção deste revestimento classificam-se basicamente em dois grupos que são os plásticos (materiais argilosos em geral) e os não plásticos (fundentes, inertes, carbonatos, talcos). A argila tem como função fornecer as características plásticas a verde, portanto, garantindo melhores propriedades durante a fase de compactação e resistência mecânica após secagem. O caulim confere plasticidade, aumentando o teor de alumina e auxiliando na brancura do produto. Os feldspatos desempenham o papel de fundentes já que proporcionam as primeiras fases líquidas que aparecem durante a queima. Podem ainda entrar na composição de uma massa de porcelanato outras matérias-primas que aumentam a fusibilidade na massa. Os materiais de natureza magnésica, tais como o talco e a magnesita são os mais usados em função de sua eficiência.

As misturas de matérias-primas utilizadas em sua fabricação caracterizam-se por serem compostas, geralmente, por uma porcentagem variável (30-50% em peso) de caulim e argilas ilítico-cauliníticas, e uma proporção similar à anterior de feldspatos sódico-potássicos. As matérias-primas devem apresentar baixo teor de óxido de ferro, não prejudicando a cor do produto queimado. Adicionalmente, são empregadas outras matérias-primas para melhorar algumas propriedades do produto ou para facilitar o processamento da composição, como areia, bentonita, carbonatos, alcalino-terrosos, talco, dentre outros (SANCHEZ, 2001).

Durante a queima, as matérias-primas que contêm minerais alcalinos (ilita, feldspatos, etc) produzem grande quantidade de fase líquida, cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura, fazendo com que penetre nos poros existentes, que assim são eliminados progressivamente por forças de capilaridade. O quartzo se dissolve parcialmente na fase líquida e a fase cristalina muilita é formada. O produto sinterizado é

constituído de uma matriz vítrea, na qual partículas de mulita e as partículas de quartzo que não se dissolvem totalmente estão dispersas. Portanto, as transformações físico-químicas podem variar, causando diferenças significativas nas propriedades do produto final. A maior parte do quartzo inicial (75% ou mais) permanece sem se dissolver, como consequência do rápido ciclo de queima com que habitualmente se produz o porcelanato (cerca de 60 minutos) RODRIGUEZ e PIANAROS (2004).

As fases cristalinas do porcelanato são as mesmas encontradas em certas porcelanas, podendo ser determinadas por difração de raios-X. O porcelanato é fabricado em ciclos de queima muito rápidos, com temperaturas que alcançam 1200 a 1230°C (60 minutos, comparados às 24 horas ou mais da porcelana).

Cerca de 60 a 70% da quantidade teórica de mulita cristaliza na forma de pequenos grânulos (mulita primária), não se observando a presença de mulita acicular (mulita secundária).

A produção nacional gira em torno de 4,1 milhões de m² por ano. Os produtores nacionais são: Eliane – SC, Cecrisa – MG, Portobello – SC e Cerâmica Elizabeth – PB. Sabendo-se que o porcelanato é fabricado nas mais diversas cores, sendo importante observar que o resíduo acompanha a tonalidade da peça, ou seja, quando o porcelanato estiver sendo produzido cor branca, o resíduo apresentará uma tonalidade clara, e quando esta cor for a preta, a tonalidade do resíduo será um cinza claro.

3.7.2 Polimento do Porcelanato

O processo de polimento do porcelanato ocorre em um equipamento que possui várias cabeças polidoras compostas de materiais abrasivos, que em contato com as peças em alta rotação e velocidade controlada em presença de água, executam o polimento, utilizando gradativamente uma granulometria mais fina, até conseguir-se o resultado desejado.

O porcelanato pode ser submetido a um processo de polimento superficial removendo alguns décimos de milímetros de material da superfície da peça cerâmica. Esse produto é um revestimento cerâmico impermeável, totalmente vitrificado, esmaltado ou não, cuja peça queimada é branca ou artificialmente colorida.

Segundo BITTENCOURT e BENINCÁ (2002), a primeira parte da polidora é responsável pelo desgaste acentuado da peça, ou seja, é onde acontece o nivelamento da superfície da peça, com abrasivos adiamantados e magnesianos de granas grossas (100 a 220 μm). As cabeças adiamantadas retiram a maior parte de material na peça. A segunda etapa prepara a peça para o polimento, apagando os riscos deixados pelas cabeças anteriores e deixando a peça totalmente uniforme (lisa). As granas utilizadas são de 240 a 700 μm . A terceira etapa utiliza-se normalmente granas entre 800 e 3000 μm . A pureza das matérias-primas usadas na fabricação dos abrasivos é de fundamental importância para a qualidade dos mesmos e farão parte do resíduo resultante do polimento do porcelanato.

Todo o processo de polimento é feito com água. A quantidade de água usada diariamente em uma unidade de polimento é muito grande, podendo chegar a mais de 4.000 litros, por isso é necessário à recirculação desta água em circuito fechado para o reaproveitamento. Com este procedimento, torna-se necessário um tratamento químico / físico na água para posterior decantação dos resíduos do polimento (abrasivos, porcelanato) e filtro-prensagem. A água é distribuída na máquina em cada cabeça polidora e retira os resíduos gerados que poderiam ficar sobre as peças causando riscos e arranhões.

3.7.3 Quantidade de RPP Gerado e Estudo da Viabilidade Técnica da Reciclagem

O volume total do resíduo de polimento de porcelanato (úmido) produzido gira em torno de 8 m³ por dia (\pm 20 toneladas) na fábrica da Cecrisa em Santa Luzia, Minas Gerais. Este material é depositado em caçambas e posteriormente, transportado e lançado em aterros sanitários da prefeitura.

A viabilidade de reciclagem de um resíduo depende de alguns fatores, tais como:

- distância de onde é produzido o resíduo e o local do efetivo aproveitamento;
- custo de transporte dos resíduos;
- volume de resíduos disponíveis para o reprocessamento;
- custo de estocagem do resíduo no local de aproveitamento.

4. Metodologia

4.1. Programa Experimental e Resultados

O programa experimental consistirá na caracterização do resíduo do porcelanato e no estudo da influência desta adição nas principais propriedades do concreto.

4.1.1. Caracterização do Resíduo de Polimento do Porcelanato (RPP)

As características de um material são alguns parâmetros que especificam os aspectos químicos e físicos de sua composição e estrutura, tais como a sua composição química, impurezas presentes, as fases presentes, porosidade e estrutura dos poros, a distribuição de tamanho das partículas, forma das partículas, sua massa específica, área superficial específica e outros. As propriedades finais do concreto com adição de resíduo de polimento de porcelanato irão depender das características das matérias primas iniciais e de todo o processamento utilizado.

Na caracterização do Resíduo de Polimento de Porcelanato foram realizadas a análise química via úmida e a fluorescência de raios X, complementada com as informações sobre a estrutura utilizando-se a difração de raios X, a granulometria a laser, picnometria à hélio, adsorção de nitrogênio e imagens obtidas pela microscopia eletrônica de varredura – MEV (elétrons primários e secundários). Em conjunto com a análise de imagens foi possível realizar a espectrometria de dispersão de energia - EDS, determinando a composição química aproximada de partículas, de regiões ou pontos de interesse.

4.1.2. Análise Química Via Úmida

Após ter sido seco ao ar livre, o RPP foi destorroado em moinho de porcelana, com esferas de 2, 3, 4 cm de diâmetro, no total de 20, durante 5 minutos.

Análise foi realizada no Laboratório de Análises Químicas do Departamento Engenharia Química da UFMG. O resíduo deve passar na peneira de 150 mesh e estava seco.

Os elementos analisados foram:

- CaO, MgO, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, FeO, Al₂O₃, SnO, PbO, MnO, TiO₂, fosfatos, SO₃, SiO₂, Al₂O₃.

Tabela 4.1 Análise química via Úmida do RPP

Referência da Amostra:		RPP	
Elementos Determinados		Teores encontrados (%)	
		Óxidos, por estequiometria	
Si	28,87%	SiO ₂	61,77%
Al	12,15%	Al ₂ O ₂	22,96%
Fe	0,24%	Fe ₂ O ₂	0,25%
Ca	0,63%	CaO	0,88%
Mg	2,74%	MgO	4,55%
K	1,07%	K ₂ O	1,29%
Na	1,68%	Na ₂ O	2,27%
P	0,02%	P ₂ O ₄	0,04%
Ti	0,14%	TiO ₂	0,24%
Sn	< 0,10%		
Pb	< 0,10%		
Mn	0,02%	MnO	0,03%
SO ₃	0,01%		
PPC	5,54%		

Pode-se observar que os teores de óxido de magnésio (parte proveniente do abrasivo utilizado no polimento do porcelanato) e óxido de cálcio, que provocam reações expansivas na hidratação, aparecem em quantidades inofensivas para uso no concreto. É importante lembrar que o óxido de magnésio que reage na hidratação aparece na forma

do periclásio, sendo necessário analisar a difração de raios X para comprovar a sua presença. O teor de álcalis também é inferior ao permitido em cimentos. Grande parte do resíduo é formada por sílica e alumina. Através da NBR 12653, norma esta que classifica as pozolanas em classes conforme sua origem e exigências mínimas quanto à sua composição, observa-se que o RPP aparece na classe N como uma argila calcinada e apresenta uma quantidade de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ superior a 70%. O óxido SO_3 está abaixo de 4%, o álcali Na_2O aparece um pouco acima de 1,5% e a perda ao fogo abaixo da porcentagem máxima de 10%. De acordo com sua análise química o RPP pode ser considerado pela NBR12653 como uma pozolana, entretanto é necessário que a sílica esteja no estado amorfo.

4.1.3. Análise Química Fluorescência de Raios X

A análise química, identificando e determinando os elementos presentes em maiores quantidades, foi feita por Fluorescência de raios-X, utilizando-se o aparelho Philips PW 2400. A análise apresentou teores altos de Si e O, médios de Al e Zr, baixos de Mg e traços de Fe, Ca, K, P e Na. O ZrO_2 não foi apresentado na análise química via úmida, mas sua presença foi significativa no RPP através da análise química por fluorescência de raios X e está relacionada com o grau de brancura do porcelanato.

4.1.4. Análise Estrutural

A análise estrutural permite identificar as fases presentes, sua estrutura e microestrutura. As técnicas empregadas para a análise estrutural serão a difração de raios X, a microscopia eletrônica de varredura (microscópio marca PHILIPS, JSM-80) e a análise química de micro-regiões por microsonda eletrônica (EDX – acoplado no MEV).

A difração de raios X (aparelho PHILIPS, modelo PW- 3710, radiação $\text{CuK}\alpha$, corrente de 30mA, voltagem 40kV e comprimento de onda de $1,54051 \text{ \AA}$) é muito útil para obter o espectro com informações importantes para a caracterização do resíduo de polimento de porcelanato. O resultado da técnica é um difratograma contendo, na ordenada, a intensidade dos picos de difração das fases químicas da amostra e, na abscissa, o ângulo ou a distância interplanar dos mesmos. A intensidade de picos

característicos de cada mineral é proporcional a sua quantidade. A identificação das fases é feita pela comparação dos espaçamentos (ou ângulos de difração) da amostra com dados conhecidos para materiais cristalinos, disponíveis em um banco de dados.

É importante determinar a forma apresentada no difratograma mostrando que os compostos químicos presentes no RPP se apresentam na forma cristalina ou amorfa, relacionando com suas características pozolânicas. O material cristalino apresenta um espectro com picos mais definidos. Já o material amorfo apresenta um espectro na forma de um alo, sem picos definidos.

O espectograma da difração de raios X apresentou picos bem definidos, tais como de quartzo e mulita, demonstrando o RPP ser uma estrutura basicamente cristalina.

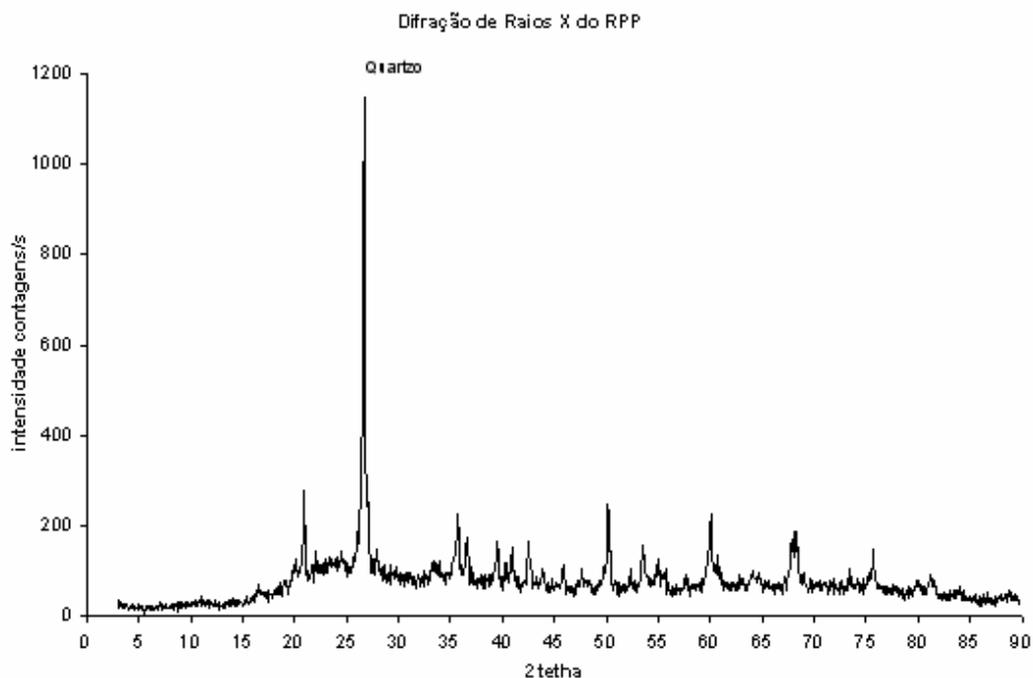


Figura 4.1 – Difração de Raios X do Resíduo de Polimento do Porcelanato

Entretanto, na região da sílica, podemos observar um suave alo no espectograma, caracterizando uma pequena quantidade de sílica amorfa.

O emprego da microscopia eletrônica de varredura permitiu evidenciar a morfologia das partículas do resíduo de polimento do porcelanato, utilizando elétrons secundários, como é apresentado na figura .

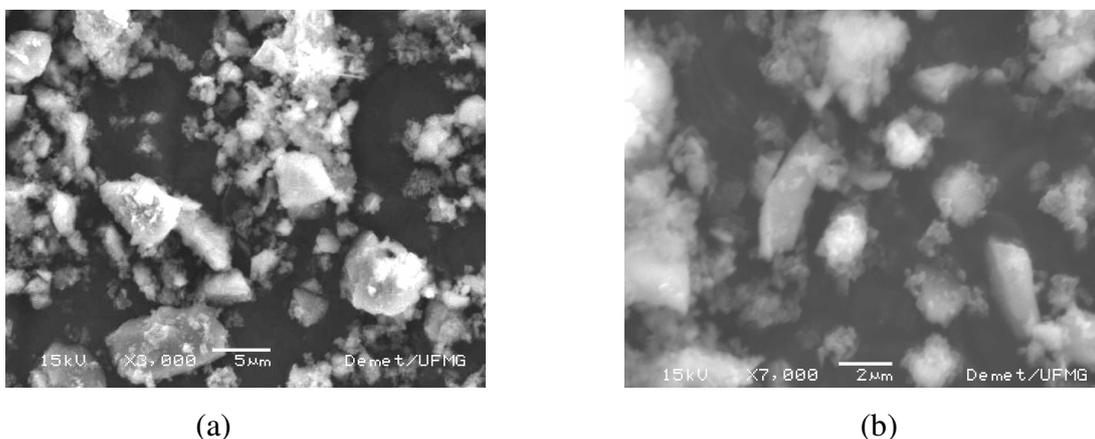


Figura 4.2 – Morfologia do grão de RPP. (a) elétrons retro-espalhados e aumento de 3000x e (b) elétrons secundários e aumento de 7000x.

As micrografias mostram que os grãos de RPP não apresentam uma forma definida, sendo irregulares e angulosos. A demanda de água é geralmente relacionada com a forma das partículas, sendo assim caracterizado o efeito rolamento para as partículas esféricas que favorecem a trabalhabilidade da argamassa, diferente das partículas irregulares e angulosas de RPP.

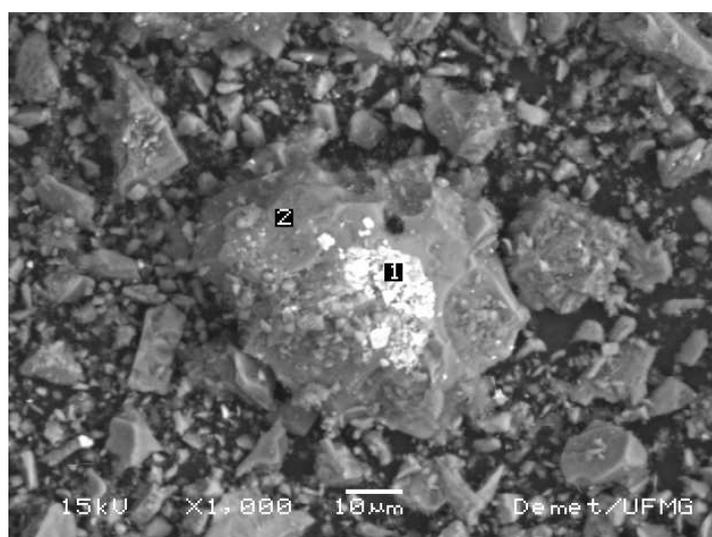


Figura 4.3 – Grão de RPP, elétrons retro-espalhados e aumento de 1000x

A espectrometria de dispersão de energia por raios X (EDX), determinou a composição química aproximada da região 1 e 2 mostradas na figura 4.3. O espectrograma é apresentado na figura 4.4 e 4.5 . A região 1 que aparece mais clara mostra a zircônia, elemento encontrado na fluorescência de raios X, e a região 2 mostra alumina e sílica.

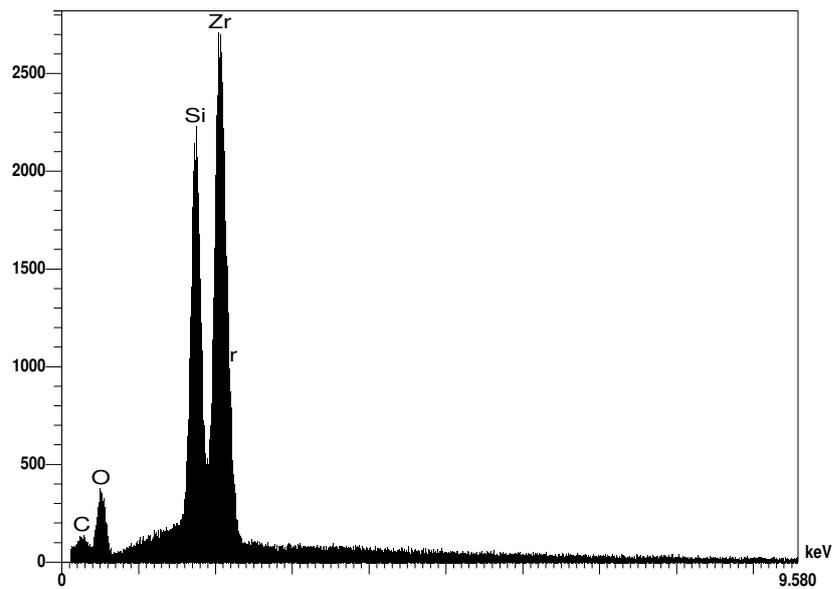


Figura 4.4 - Espectrograma da região 1 da partícula da figura 4.3 .

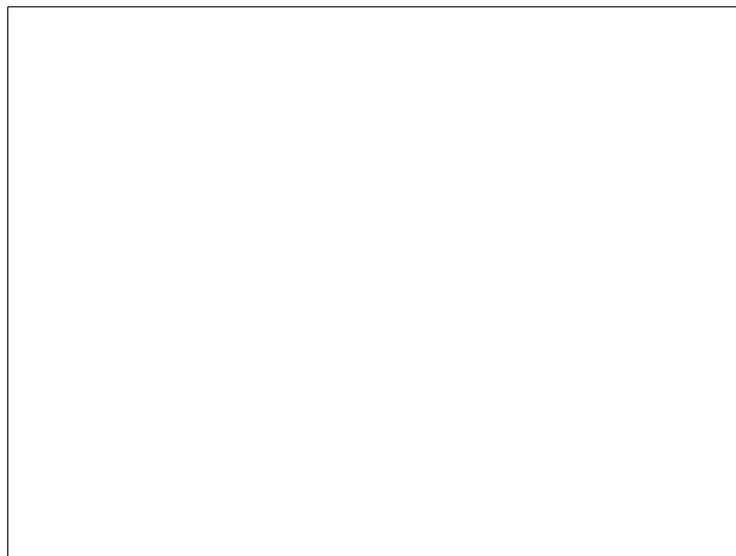


Figura 4.5 - Espectrograma da região 2 da partícula da figura 4.4

4.1.5. Granulometria à Laser

Para utilização do RPP como adição em concretos é muito importante que suas partículas possuam uma granulometria que possa preencher os espaços vazios entre os grãos de cimento, contribuindo para um maior desempenho dos concretos, o que caracteriza seu efeito *filler*. As partículas apresentam-se dispersas atravessando momentaneamente um feixe de laser causando difração, sendo as partículas de tamanho compatível com o comprimento de onda da luz. A intensidade da luz difratada é proporcional ao quadrado do tamanho da partícula e o ângulo de difração varia inversamente com o tamanho da partícula. A amostra será preparada em uma solução líquida com cerca de 0.1% de concentração volumétrica de RPP que foi destorroado em moinho de porcelana, com esferas de 2, 3, 4 cm, no total de 20, durante 5 minutos. O resultado é apresentado em forma de gráfico e numa planilha.

A granulometria foi determinada através de três amostras do RPP, de acordo com a tabela 4.2, no aparelho CILAS, apresentando o diâmetro em μm das porcentagens acumuladas, correspondentes a 10, 50 e 90%.

Tabela 4.2 – Granulometria a laser (diâmetro em μm)

Resíduo Polimento Porcelanato	D10%	D50%	D90%
Amostra 3	1,08	7,07	23,25
Amostra 2	1,03	6,61	21,47
Amostra 1	1,07	7,32	24,44
Média	1,06	7,00	23,05
Diâmetro Médio das partículas	10,01		

O resíduo apresenta uma granulometria apropriada para preencher os vazios deixados pelos grãos de cimento, sendo que este apresenta diâmetros de 10 a 50 μm .

Quanto ao tamanho das partículas o sistema pode ser classificado como:

Sistema granular – partículas acima de 44 μm , forças gravitacionais predominam, o material flui livremente.

Sistema coloidal – partículas menores que $1\mu\text{m}$, as forças de superfície predominam controlando o comportamento do sistema.

Pó – partículas de 1 a $44\mu\text{m}$, forças gravitacionais e de superfície da mesma ordem.

Pode-se observar que o resíduo de polimento de porcelanato comporta-se como um pó, no qual as forças de superfície têm grande efeito, e dependendo do meio, podendo ser alterado por surfactantes.

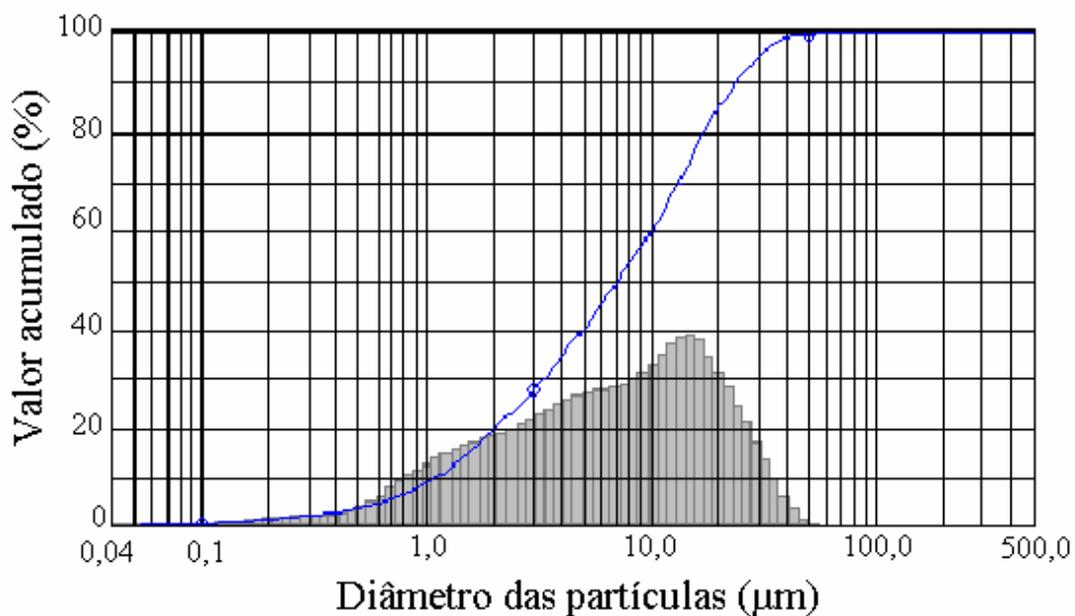


Figura 4.6 – Gráfico diâmetro das partículas (μm) x porcentagem acumulada

4.1.6. Massa específica e Área Superficial

Para partículas ou sólidos porosos podem-se definir três tipos de densidade: a verdadeira, a aparente e a volumétrica.

A densidade verdadeira envolve apenas o volume real do sólido sem nenhum poro. A densidade volumétrica inclui os poros abertos e fechados (volume geométrico). Já a densidade aparente envolve o volume do sólido mais o volume dos poros fechados.

A picnometria de líquido é um dos métodos utilizados para determinar a massa específica. Neste método, um picnômetro calibrado contendo o material é pesado, um líquido de densidade conhecida é então adicionado e o picnômetro é novamente pesado. Ao se mergulhar a amostra sólida num recipiente contendo um determinado volume de fluido o volume deslocado é igual ao volume da amostra. Diferentes densidades podem ser medidas de acordo com o líquido utilizado.

Para medir a densidade aparente, foi utilizado um picnômetro com o querosene como líquido de alta molhabilidade, ou seja, que possa penetrar nos poros abertos do corpo sólido. A massa específica foi então determinada segundo a NBR 6474 (ABNT, 1985).

A picnometria de gás (picnometria de hélio) foi também utilizada para determinar a massa específica do resíduo, sendo esta técnica recomendada para densidade de pós finos abaixo de 10 μ m.

A massa específica do RPP, obtida no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFMG pela Picnometria a Hélio, foi de 2,49 g/cm³ e pela picnometria de líquido, utilizando o querosene, apresentou uma massa específica de 2,48 g/cm³.

A área superficial foi determinada através da adsorção de nitrogênio. Também chamados de ensaios de condensação capilar, mede-se a quantidade de gás adsorvido ou desorvido em uma superfície sólida, em alguma pressão de vapor de equilíbrio, pelo método volumétrico estático. A quantidade de gás adsorvido na pressão de equilíbrio é a diferença entre a quantidade de gás admitida ou removida e a quantidade requerida para preencher o espaço ao redor do adsorvente (espaço vazio). Há vários modelos para avaliar a área superficial de poros, sendo utilizado neste trabalho o método Brunauer-Emmett-Teller (BET). A equação BET requer a linearização em um gráfico, sendo restrito a uma região da isoterma de adsorção, geralmente na faixa 0,05 a 0,35 de pressão / pressão relativa. Os resultados da técnica serão apresentados na forma gráfica e na tabela de valores do tipo de BET com a área superficial específica (m²/g).

As análises de área superficial específica BET por adsorção de gás N₂ foram realizadas por meio do equipamento Quantachrome NOVA 1200. A área da superfície específica do RPP foi de 15,74 m²/g e a do cimento CPV foi de 1,49 m²/g. Observa-se que a superfície específica do resíduo do polimento do porcelanato é 10 vezes maior que a do cimento CPV.

4.1.7. Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica do resíduo de polimento de porcelanato foi verificada através do método químico de determinação de atividade pozolânica em cimento pozolânico, conforme a NBR 5753, também conhecida como Método de Fratini. Este método é utilizado apenas para determinar se um cimento é ou não pozolânico, por isso foi necessário utilizar o cimento CPV Estrutura com pouca adição substituindo 35% do seu volume absoluto pelo RPP. Caso o RPP possua alguma característica pozolânica, a nova mistura (cimento CPV + RPP) será considerado um cimento pozolânico pelo método de Fratini.

Neste método, a atividade pozolânica é avaliada comparando a quantidade de hidróxido de cálcio presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com quantidade de hidróxido de cálcio que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade. Em um cimento Portland pozolânico, a concentração de hidróxido de cálcio em solução é sempre inferior à concentração de saturação. O ensaio mostra que, com 20 g de cimento para 100ml de água à temperatura de 40°C o equilíbrio é praticamente alcançado em sete dias, sendo que para esta experiência foi analisado o resultado ao final de quatorze dias.

O resultado é expresso pela alcalinidade total e o teor em óxido de cálcio em milimoles por litro, sendo marcado sobre o diagrama de atividade pozolânica o ponto representativo do teor em óxido de cálcio em função da alcalinidade total. O cimento é considerado como pozolânico se o ponto estiver situado abaixo da isoterma de solubilidade. O ensaio foi realizado pelo laboratório da ABCP. A isoterma de solubilidade é apresentada na figura 4.7 e mostra que a mistura obtida com o cimento CPV Estrutura e o resíduo de polimento de porcelanato apresentou atividade pozolânica.

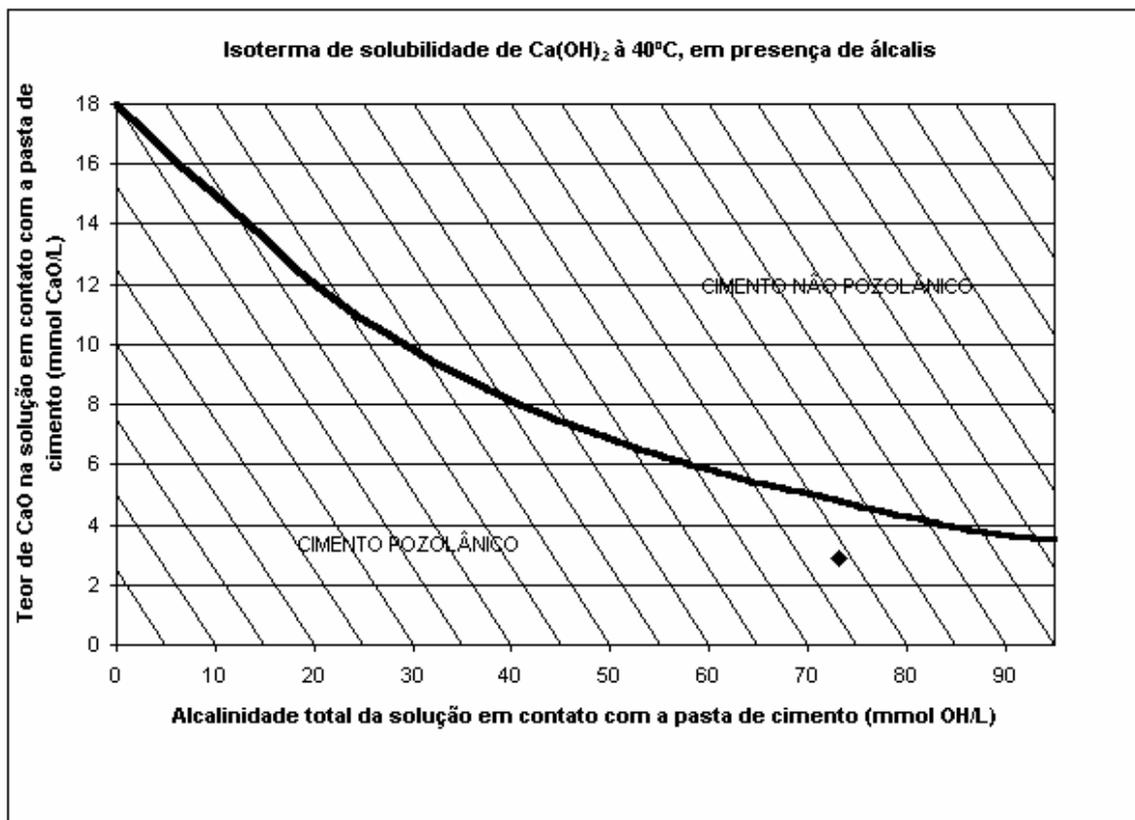


Figura 4.7 - Gráfico do ensaio de pozolanicidade de cimento portland pozolânico - 14 dias

Esta atividade pozolânica é devido a parte da sílica amorfa, presente na difração de raios X do resíduo de polimento de porcelanato, que reage com o Ca(OH)_2 formando C-S-H. O cimento CPV Estrutura não é um cimento pozolânico, entretanto quando misturado com o RPP, apresentou característica de cimento pozolânico, comprovando que o resíduo de polimento de porcelanato contribui para a atividade pozolânica.

4.2. Avaliação dos Concretos com Adição de RPP

As variáveis escolhidas para a análise do concreto com adição de RPP estão relacionadas com suas propriedades no estado fresco (trabalhabilidade, consistência) e suas propriedades no estado endurecido (a resistência à compressão e a tração por compressão diametral, aspectos de durabilidade - índice de vazios). A zona de transição da pasta de cimento / agregado foi analisada com o auxílio de imagens do MEV.

4.2.1. Materiais Utilizados

O cimento escolhido para elaboração deste experimento será o CP V Estrutura, pois apresenta pouca adição mineral e não é considerado pozolânico. Sua densidade de $3,14\text{g/cm}^3$ foi verificada através da picnometria à hélio.

Agregados utilizados na preparação dos concretos foram naturais. A areia utilizada foi a fina lavada, quartoza disponível comercialmente. As características físicas e a distribuição granulométrica estão relacionadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Caracterização do agregado miúdo usado na produção dos concretos

Composição Granulométrica	
Peneira (ABNT) (mm)	% Média Acumulada
6,3	0
4,8	0
2,4	0
1,2	23,81
0,6	51,02
0,3	75,15
0,15	100
< 0,15	100
Dimensão Máxima Característica	2,40mm
Módulo de Finura (NBR 7217)	2,5
Graduação (NBR 7217)	Média
Massa Específica (NBR 9776)	$2,63\text{g/cm}^3$
Material Pulverulento% (NBR 7219)	1,59%

Já a brita foi a de origem calcária, com as características físicas e distribuição granulométrica apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Caracterização do agregado graúdo usado na produção dos concretos

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
Peneira (ABNT) (mm)	% Média Acumulada
19	0
12,5	52,1
9,5	83,8
6,3	98,7
4,8	100
< 4,8	100
Dimensão Máxima Característica	12,5mm
Módulo de Finura (NBR 7217)	6,79
Massa Específica (NBR 9937)	2,72g/cm³
Torrões de Argila (NBR 7218)	Sem presença
Índice de Forma (NBR 7809)	2,5

A água utilizada para a produção dos concretos foi proveniente do laboratório da Universidade Federal de Minas Gerais.

Foi utilizado, após ter sido seco ao ar livre, o RPP, que foi destorroado em moinho de porcelana, com esferas de 2, 3, 4 cm de diâmetro, no total de 20, durante 5 minutos.

4.2.2. Método de Dosagem

Para a análise comparativa foi utilizado o método de dosagem de concreto IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1993), fixando-se o abatimento de tronco de cone em 60 ± 10 mm e obtendo o teor de argamassa ideal. Os traços utilizados foram determinados levando-se em consideração a relação água/cimento (0,44 – 0,60 – 0,78) e o teor de RPP em relação ao cimento (0, 10 e 20%). Os corpos-de-prova de concreto, cilíndricos 10 x 20 (cm), foram confeccionados de acordo as recomendações da NBR 5738. A tabela 4.5 apresenta os traços, em massa, resultantes da dosagem.

Tabela 4.5 - Dosagem dos concretos executados

Número do corpo de prova	DOSAGEM						teor de argamassa ideal	Quantidade Corpos de Prova
	a/c	adição %	cimento	areia	brita	a/secos		
1	0,44	0%	1	1,33	2,32	8,60%	51%	9
2	0,60			2,20	3,20		49%	12
3	0,78			3,07	4,07		47%	9
4	0,44	10%	1	1,12	2,32	8,80%	51%	9
5	0,60			1,96	3,19		49%	12
6	0,78			2,79	4,06		47%	9
7	0,44	20%	1	0,91	2,28	9,10%	51%	9
8	0,60			1,69	3,15		49%	12
9	0,78			2,49	4,00		47%	9

A mistura dos materiais para confecção dos concretos foi realizada no laboratório de Materiais de Construção da Escola de Engenharia da UFMG, colocando os materiais na betoneira na seguinte ordem: 100% do agregado graúdo, 100% da areia, 50% de água, 100% de cimento, 100% de RPP (para os concretos com 10 ou 20% de RPP) e o restante da água. Cada mistura foi preparada em torno de 6 minutos. Os corpos-de-prova, após moldagem, foram mantidos em câmara úmida até a idade de cada ensaio, com temperatura próxima de 22 ± 5 °C e umidade relativa acima de 95%.

4.3. Determinação das Propriedades do Concreto no Estado Fresco

4.3.1. Trabalhabilidade

Para a avaliação da consistência e trabalhabilidade foi realizado o teste de abatimento do tronco de cone (slump test) de acordo com a prescrição das normas NBR 7223. A tabela 4.6 apresenta os resultados dos abatimentos para os concretos.

Tabela 4.6 - Abatimento para os concretos

Mistura		Abatimento (mm)
Teor	a/c	
0%	0,44	50
	0,60	55
	0,78	55
10%	0,44	50
	0,60	65
	0,78	65
20%	0,44	50
	0,60	55
	0,78	65

Com a adição de RPP nos concretos houve um aumento na consistência e menor exsudação, devido às pequenas partículas do resíduo que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água. Os materiais com elevada superfície específica, quando usados como adição, prejudicam a homogeneização da mistura, devido à dificuldade de passagem da água.

4.4. Determinação das Propriedades do Concreto no Estado Endurecido

Para a determinação das propriedades do concreto no estado endurecido foram verificadas as resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral, porosidade efetiva através da porosimetria por intrusão de mercúrio e análise da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado através da microscopia eletrônica de varredura. Os resultados dos ensaios mecânicos foram analisados com base na análise estatística para auxiliar nas conclusões obtidas. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, através da análise de variância, cujo objetivo é testar as igualdades entre três ou mais médias, permitindo testar se a variabilidade dentro dos grupos é maior que a existente entre os grupos. De um modo geral, a análise de variância consiste em estudar a dispersão possivelmente ocasionada pelo fator em estudo, concluindo se ela é apenas aleatória (o fator não influi) ou é significativa (o fator estudado influi). O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta

analisada é determinado através de um teste de comparação entre valores calculados e os valores tabelados de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer. A hipótese que um determinado fator influência significativamente nos resultados é confirmada se o valor calculado for maior do que o tabelado. Os valores foram estabelecidos para um nível de significância de 5%, que é mais utilizado em pesquisas na área de engenharia civil.

4.4.1. Resistência à Compressão Axial

Para a verificação do efeito da adição de RPP na resistência à compressão axial foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20cm para as idades de 3, 7 e 28 dias, conforme a tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Quadro resumo dos ensaios mecânicos de resistência à Compressão Axial.

Teor	Ensaio	Idade	a/c = 0,44	a/c = 0,60	a/c = 0,78
0%	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	3 dias	3 unid	3 unid	3 unid
		7 dias	3 unid	3 unid	3 unid
		28 dias	3 unid	3 unid	3 unid
10%	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	3 dias	3 unid	3 unid	3 unid
		7 dias	3 unid	3 unid	3 unid
		28 dias	3 unid	3 unid	3 unid
20%	Resistência à Compressão Axial (NBR 5739)	3 dias	3 unid	3 unid	3 unid
		7 dias	3 unid	3 unid	3 unid
		28 dias	3 unid	3 unid	3 unid

O resultado da resistência à compressão foi apresentado na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultado resistência à compressão.

Teor RPP	a/c	3 dias				7 dias				28 dias			
		fc(Kgf)	fc(Mpa)	fcm(Mpa)	C.V.	fc(Kgf)	fc(Mpa)	fcm(Mpa)	C.V.	fc(Kgf)	fc(Mpa)	fcm(Mpa)	C.V.
0%	0,44	22000	27,45	26,62	2,71%	23000	28,70	27,78	2,89%	24000	29,95	30,16	3,16%
		21000	26,20			21800	27,20			25000	31,20		
		21000	26,20			22000	27,45			23500	29,32		
	0,60	18000	22,46	23,50	5,53%	20500	25,58	23,92	6,57%	20000	24,96	25,29	3,17%
		18500	23,08			18000	22,46			21000	26,20		
		20000	24,96			19000	23,71			19800	24,71		
	0,78	14300	17,84	18,13	1,73%	16900	21,09	20,26	3,61%	18100	22,59	22,17	3,75%
		14500	18,09			16000	19,96			17000	21,21		
		14800	18,47			15800	19,72			18200	22,71		
10%	0,44	22500	28,08	29,32	9,27%	24000	29,95	29,95	4,17%	26000	32,44	30,99	4,19%
		22000	27,45			25000	31,20			24000	29,95		
		26000	32,44			23000	28,70			24500	30,57		
	0,60	19500	24,33	24,75	1,46%	19800	24,71	25,08	1,79%	20200	25,21	25,70	1,94%
		20000	24,96			20000	24,96			20600	25,70		
		20000	24,96			20500	25,58			21000	26,20		
	0,78	15500	19,34	19,84	2,27%	17000	21,21	20,59	3,03%	18000	22,46	22,04	1,73%
		16000	19,96			16000	19,96			17600	21,96		
		16200	20,21			16500	20,59			17400	21,71		
20%	0,44	23000	28,70	29,95	4,17%	25500	31,82	31,61	3,01%	25500	31,82	31,78	0,60%
		25000	31,20			26000	32,44			25300	31,57		
		24000	29,95			24500	30,57			25600	31,94		
	0,60	18500	23,08	24,96	7,50%	20000	24,96	26,08	4,09%	22000	27,45	28,28	2,59%
		20000	24,96			21000	26,20			23100	28,82		
		21500	26,83			21700	27,08			22900	28,57		
	0,78	16000	19,96	20,26	1,55%	17500	21,84	20,71	4,78%	19000	23,71	22,54	4,99%
		16500	20,59			16000	19,96			17200	21,46		
		16200	20,21			16300	20,34			18000	22,46		

fc(Kgf) resistência à compressão em kilogramas força

fc(Mpa) resistência à compressão Mpa

C.V. coeficiente de variação

Nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10 estão apresentados os gráficos de resistência à compressão axial dos concretos produzidos.

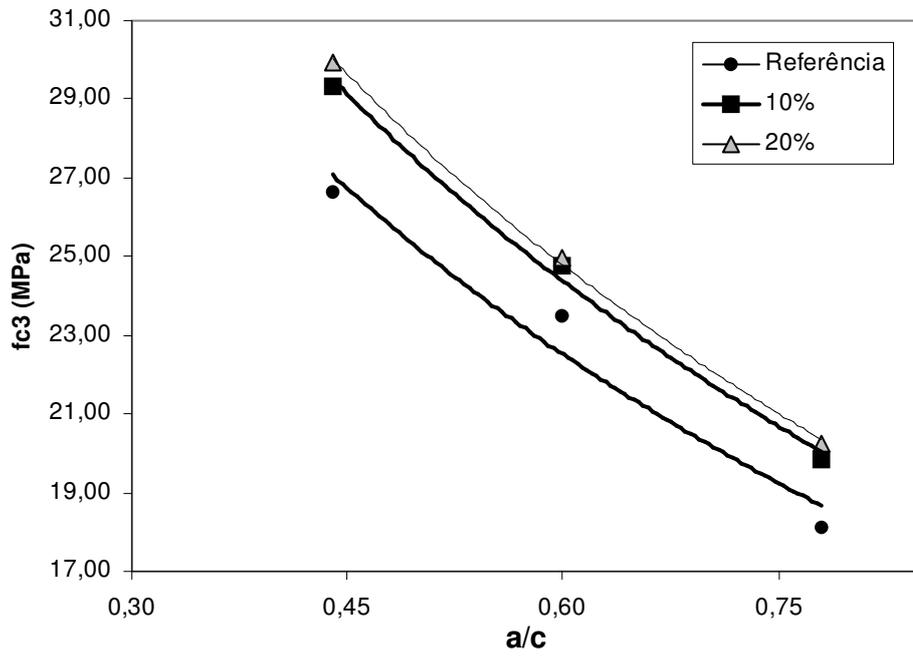


Figura 4.8 - Resistência à compressão aos 3 dias de idade

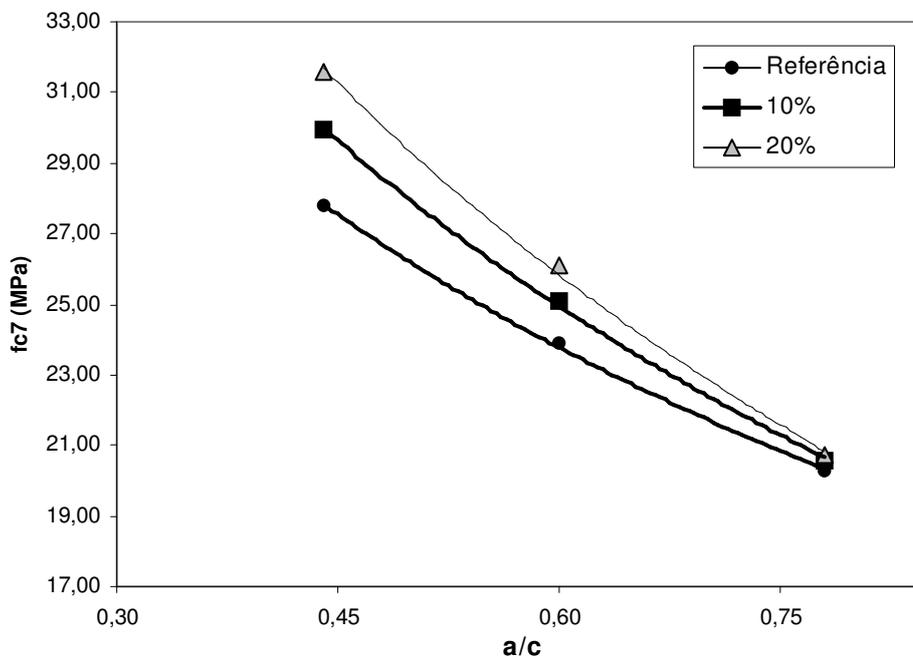


Figura 4.9 - Resistência à compressão aos 7 dias de idade

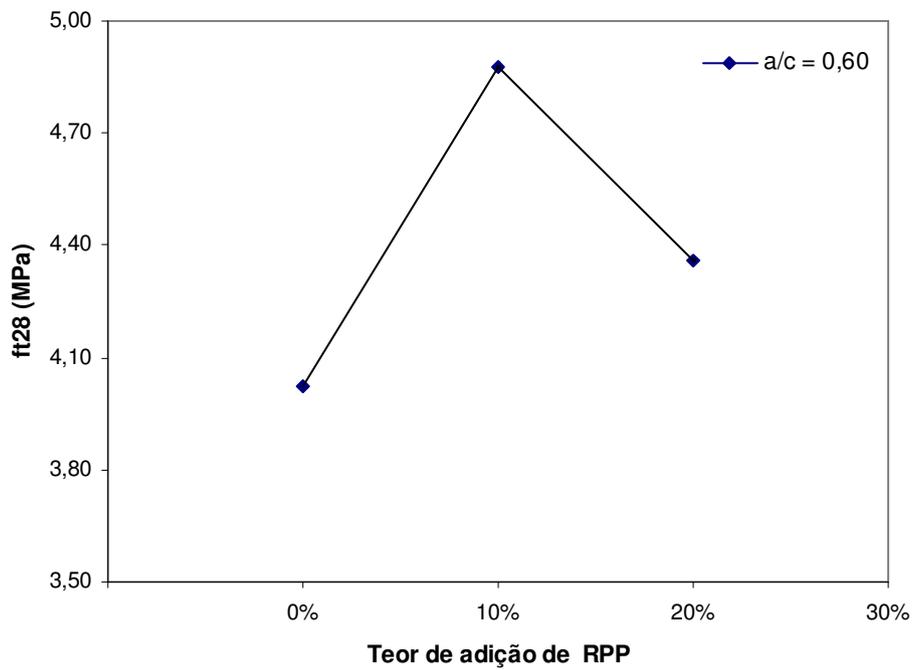


Figura 4.10 - Resistência à compressão aos 28 dias de idade.

Análise dos Resultados

Conforme apresentado nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, os concretos com adição de RPP apresentaram melhor desempenho em relação à resistência à compressão axial. Através da Análise da Variância foi observada a significância estatística de fatores como a/c, teor de adição de RPP e idade do concreto em relação à resistência à compressão axial. Na tabela 4.9 está apresentada a análise de influência dos fatores.

Tabela 4.9 - Resultados da Análise da Variância em relação à resistência à compressão axial dos concretos

Causas	GDL	MQ	Teste F	F0,05	Significância
A - Teor de RPP	2	18,80	27,30	4,46	S
B - a/c	2	370,10	537,32	4,46	S
C - Idade	2	26,31	38,20	4,46	S
Interação A e B	4	3,25	2,36	3,84	NS
Interação A e C	4	1,76	1,28	3,84	NS
Interação B e C	4	0,66	0,48	3,84	NS
Residual A, B e C	8	2,75	-	-	-
Total	26	423,65	-	-	-

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Efeito significativo na resistência à compressão

NS – Efeito não significativo na resistência à compressão

Pode-se observar, através da tabela 4.9, que a relação a/c, o teor de adição de resíduo de polimento de porcelanato, e a idade do concreto quando analisados separadamente influem de forma significativa sobre a resistência à compressão axial.

Entretanto, observa-se que a interação entre os fatores teor de adição e a idade, o teor de adição e a relação a/c e a relação a/c e a idade não trazem mudanças significativas na resistência à compressão axial.

Segundo Jardel (2000), a falta de interação entre o teor de adição de um resíduo e idade do concreto, constatados pela análise de variância, mostra que a adição não provoca aumentos significativos na resistência à compressão axial ao longo do tempo, sendo comum em adições que apresentam pouca ou nenhuma atividade pozolânica.

Para os concretos produzidos com 10% de adição de RPP foi observado um ganho médio de 8,3% na resistência à compressão em relação aos concretos de referência, enquanto que para os concretos com adição de 20% houve um aumento de 10,1 % em relação ao concreto de referência, considerando a idade de 3 dias. Já para a idade de 28 dias, os concretos produzidos com 10% apresentaram um ganho de 5,1% em relação aos concretos de referência e os concretos com adição de 20% o aumento foi de 9%.

OLLIVIER (1998) afirma que a presença de partículas inertes na zona de transição do concreto nas primeiras idades atua como pontos de nucleação desorientando a formação preferencial do hidróxido de sódio, dificultando a formação de planos de fraturas contíguos, que enfraquecem o concreto. Sabe-se que RPP possui pouca atividade pozolânica, entretanto a sua alta finura atuou como filer nos poros e na zona de interface matriz/agregado, agindo como agente densificador destas regiões do concreto durante o processo de hidratação, garantindo uma maior resistência à compressão.

GOLDMAN e BENTUR (1993) mostram que adições de inertes ao concreto, apresentaram efeito filer e de empacotamento, densificando a zona de transição de modo idêntico a um concreto executado com sílica ativa, sendo assim responsáveis pelo aumento da resistência à compressão.

4.4.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para a avaliação da influência da adição do RPP na resistência à tração por compressão diametral foram rompidos três corpos-de-prova cilíndricos 10 x 20cm aos 28 dias. Na tabela 4.10 é apresentado o quadro resumo de ensaios mecânicos de resistência à Tração por Compressão Diametral.

Tabela 4.10 - Quadro resumo ensaios mecânicos de resistência à Tração por Compressão Diametral.

Teor	Ensaio	Idade	a/c = 0,60
0%	Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222)	28dias	3 unid
10%	Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222)	28dias	3 unid
20%	Resistência à Tração por Compressão Diametral (NBR 7222)	28 dias	3 unid

São apresentados os resultados encontrados para a resistência à Tração por Compressão Diametral na tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resultado resistência à Tração por Compressão Diametral.

Teor RPP	a/c	28 dias				C.V.
		fc(Kgf)	ft(Kgf)	ft(Mpa)	ftm(Mpa)	
0%	0,60	12900	410607	4,02	4,02	0,78%
		12800	407424	3,99		
		13000	413790	4,06		
10%	0,60	15300	486999	4,77	4,88	2,25%
		16000	509280	4,99		
		15600	496548	4,87		
20%	0,60	14100	448803	4,40	4,36	0,90%
		14000	445620	4,37		
		13850	440846	4,32		

A partir dos resultados da tabela 4.11 foi elaborado o gráfico de resistência à tração por compressão diametral para 28 dias, conforme figura 4.11.

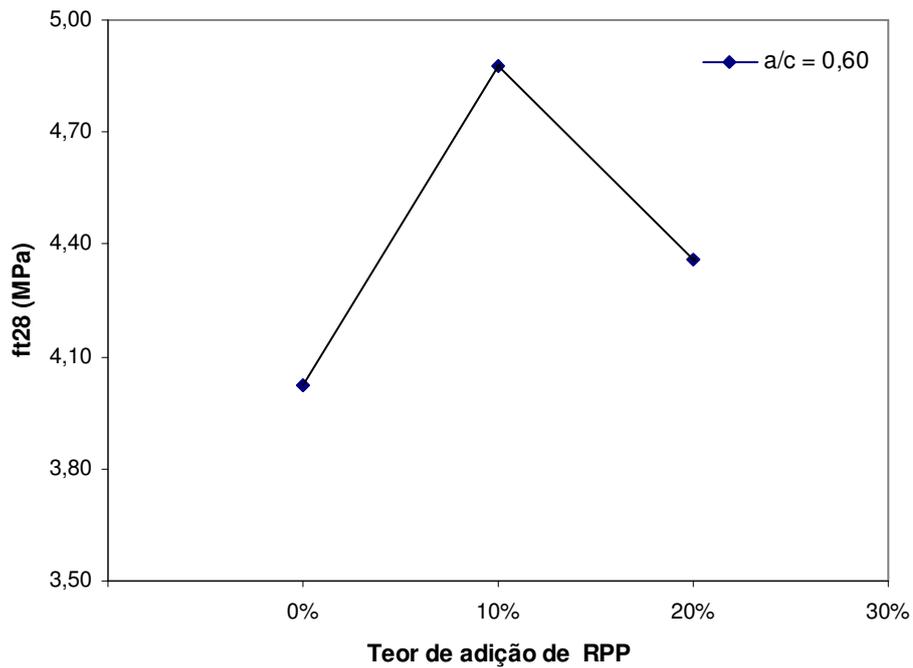


Figura 4.11 - Resistência à tração por compressão diametral para 28 dias.

Análise dos Resultados

Foi utilizada a análise de variância para verificar se o teor de adição de RPP tem efeito significativo na resistência à tração por compressão diametral, apresentada na tabela 4.12.

Tabela 4.12 Análise de variância para verificar efeito significativo do teor de RPP na resistência à tração por compressão diametral

Causas	GDL	MQ	Est de var	Teste F	F0,05	Significância
S A	2	1,11	0,55	6,15	4,46	S
S R	2	0,18	0,09			
Total	4	1,11	-	-	-	-

S A - variação entre os teores de resíduo

S R - variação dentro do mesmo teor de resíduo

GDL – Graus de Liberdade MQ – Média Quadrada

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Efeito significativo na resistência à compressão

NS – Efeito não significativo na resistência à compressão

Os resultados da tabela 4.12 mostram que há influência significativa do teor de adição em relação à resistência à tração por compressão diametral.

Conforme apresentado na figura 4.10, pode-se observar que os concretos com 10% de adição de RPP apresentaram melhor desempenho que os concretos com adição de 20% e os concretos de referência. Os concretos com 10% de adição obtiveram um ganho na resistência à tração por compressão diametral de 21,39% em relação aos concretos de referência, já os concretos com 20% esse ganho foi de 8,45%.

Percebe-se que há um ganho substancial de resistência à tração à medida que aumenta o teor de adição para 10%, onde a densificação da pasta diminui a tendência de formação de microfissuras que levam à ruptura do material. Esse ganho está relacionado também com o efeito fíler responsável pelo preenchimento dos interstícios e a atividade pozolânica, proporcionando uma maior quantidade de produtos hidratados.

Para os concretos produzidos com adição de 20% de RPP, as partículas de filler também funcionam como agentes de nucleação, acelerando o processo de hidratação, entretanto devido a maior quantidade de partículas de RPP na pasta de cimento, provavelmente há diminuição da ligação entre os produtos hidratados, enfraquecendo o concreto.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a resistência à tração apresenta-se ser muito mais influenciada pelas características da zona de transição que a resistência à compressão. Isto acontece porque, na resistência à compressão, o concreto chega ao estágio de ruptura já em um estado de fissuração completa, onde existem numerosas fissuras espalhadas por todo o corpo-de-prova. Já na resistência à tração, as fissuras se propagam em direção transversal à aplicação da tensão e a ruptura é função da união apenas de algumas fissuras.

A fratura acontece pela zona de transição da pasta de cimento e agregado quando não há ligações químicas entre o grão de adição e os compostos cimento hidratado e, quando há adição de materiais inertes a fratura pode se propagar pelo encontro filler – filler. De acordo com CABRERA (1998), o efeito físico do filler, considerando à resistência aos esforços de tração, é maior nas primeiras idades, devido à aceleração da hidratação do cimento nestas idades.

4.4.3. Porosidade Efetiva

A porosidade efetiva é determinada através de um líquido que penetra nos poros pequenos. Considerando-se um líquido com grande tensão superficial, ou seja, molha pouco a superfície de um sólido, o diâmetro D do poro é dado pela expressão:

$$D = \left(\frac{1}{P} \right) \cdot 4\gamma \cos \theta$$

Onde P é a pressão aplicada, γ é a tensão superficial e θ o ângulo de contato. Os poros raramente são cilíndricos, sendo a equação acima apenas um modelo. A porosimetria de mercúrio não é a técnica que melhor permite o acesso à estrutura de poros de concretos, mas é aquela que cobre mais aproximadamente toda a faixa de porosidade existente e é

importante para a comparação entre concretos com diferentes níveis de adições de resíduos.

A distribuição do tamanho dos poros das amostras de concreto foi determinada utilizando a porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP), através do aparelho AUTOPORE III 9410 e considerando o ângulo de contato de 140,5 graus. Foram analisados pedaços da pasta de cimento que estavam em contato com a brita e retirados dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão, para a relação a/c de 0,44 na idade de 63 dias. Os resultados são apresentados na tabela 4.13 e na figura 4.12.

Tabela 4.13 – Resultado da porosimetria de mercúrio das amostras de concreto

Teor de adição de RPP	VTM	ATP	DMP	DV	PO
Concreto com 0% de adição	0.0740	12.608	0.0415	2.111	15.63 %
Concreto com 10% de adição	0.0657	12.144	0.0334	2.130	14.01 %
Concreto com 20% de adição	0.0510	14.807	0.0186	2.156	10.35 %

VTM - volume total de mercúrio na amostra de concreto ml/g

ATP - área total do poro m²/g

DV - densidade do volume g/ml

DMP – diâmetro médio do poro micrometros

PO - Porosidade %

Os concretos com 10 % de adição de RPP apresentaram um diâmetro médio de poros de 0.0334 micrometros, apresentando assim uma redução de 20% em relação ao diâmetro médio de poros dos concretos de referência, já para os concretos com teor de 20% de adição de RPP e diâmetro médio de poros de 0.0186 micrometros, essa redução chegou a 55,18%. A adição fíler promoveu um maior refinamento desta estrutura devido sua dispersão na mistura, e um preenchimento de vazios. A adição fíler favorece a resistência capilar, pois preenche os poros, contribuindo para a durabilidade das estruturas de concreto.

De acordo com a tabela 4.13, pode-se observar um aumento de 17,44% na área superficial dos poros dos concretos com 20 %, em relação aos de referência, devido ao refinamento da estrutura.

A porosidade diminuiu com o aumento de teor de RPP, sendo que para os concretos de referência a porosidade foi de 15,63 %, para os concretos com 10 % a porosidade foi de

14,01%, já para os concretos com 20 % a porosidade diminuiu consideravelmente para 10,35 %.

Considerando os concretos com teores de 20% de RPP, a densidade do volume foi de 2,156g/ml, chegando a 2,13% a mais que a densidade do concreto de referência, evidenciando portanto a densificação da zona de transição pasta de cimento e agregado. Já para os concretos com 10% de RPP o aumento da densidade foi de 0,94% em relação à densidade do concreto de referência.

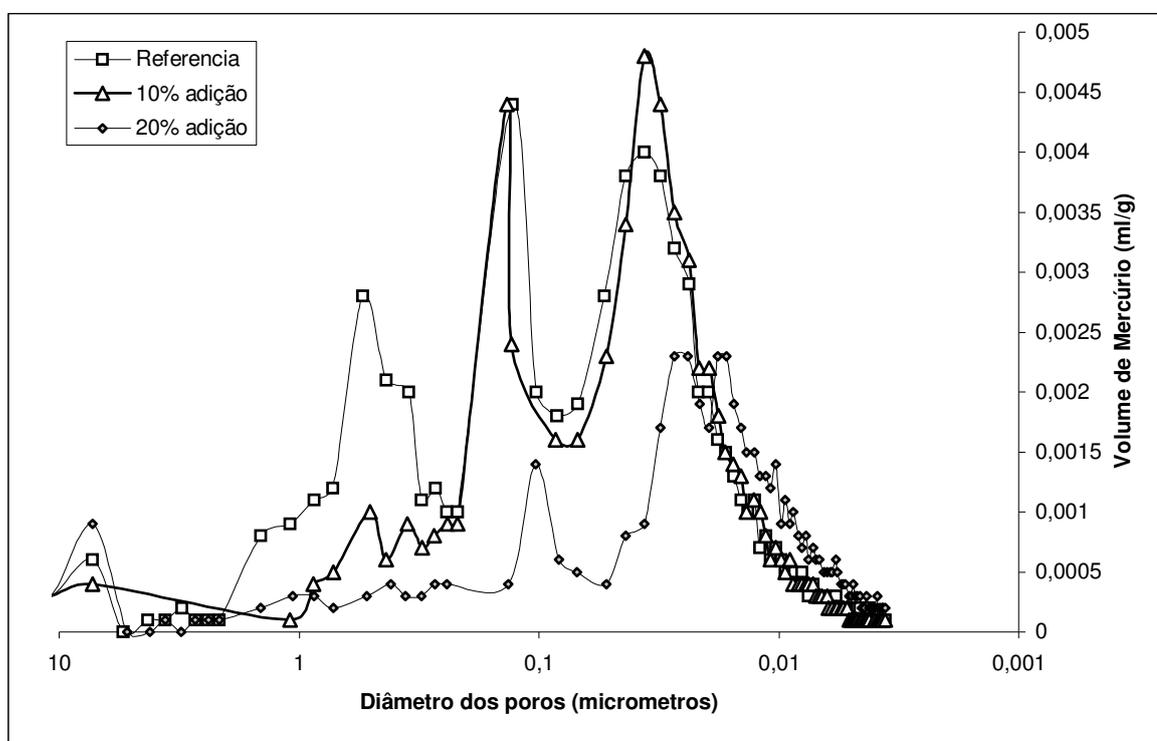


Figura 4.12 – Diâmetro dos poros em relação ao volume acumulado de mercúrio

GRIGOLI e HELENE (2001) em seu trabalho indicam que a presença de materiais inertes finos nos concretos melhora o seu desempenho quanto às suas propriedades físicas que dependem da rede de vazios e poros, onde a água dentro dos poros capilares e zonas de interfaces entre pasta e agregado, atraem os grãos finos de quartzo por força de atração capilar, permanecendo nas regiões dos poros durante o processo de hidratação, atuando como pontos de nucleação, formando barreiras no interior dos poros ao longo do processo de hidratação, interrompendo a continuidade destes poros.

A deterioração do concreto está relacionada com a sua permeabilidade e conectividade dos poros. MEHTA e MONTEIRO (1994) explicam que o concreto sujeito às cargas de trabalho sofre microfissuras e que estas podem alterar a permeabilidade do concreto, facilitando dessa maneira a corrosão das armaduras. A corrosão ocupa um volume maior que o original resultando em tensões internas maiores trazendo assim a fissuração do concreto.

4.4.4. Análise em MEV através de elétrons secundários e elétrons retro-espalhados

Foi analisada e investigada a zona de transição, por ser esta a região de maior porosidade do concreto, utilizando as imagens do microscópio eletrônico de varredura, para o concreto com 0%, 10% e 20% de resíduo de polimento de porcelanato. Os raios X (EDX) característicos permitiram a análise química elementar do material observado na microscopia eletrônica. Através da análise de imagens foi possível observar a região de transição entre a pasta de cimento e o agregado, cujas características são tão importantes para compreender os fenômenos que ocorrem na macroestrutura do concreto. Considerar a zona de transição pasta de cimento e agregados no estudo das propriedades do concreto é interessante, uma vez que, esta região apresenta propriedades físicas e químicas bem distintas do restante da matriz de cimento. O tamanho dos cristais e a sua disposição orientada podem reduzir a resistência de ligação entre a matriz e o agregado, influenciando nas propriedades mecânicas. Foram utilizados para a análise no MEV pedaços do concreto retirados dos corpos de prova rompidos no ensaio de compressão, para a relação a/c de 0,60 na idade de 63 dias. A metalização de amostras foi feita com carbono para evitar um efeito chamado carregamento, e prejudicar as imagens.

A figura 4.13 (a) e (b) mostram a zona de transição pasta de cimento/brita do concreto de referência com a relação a/c de 0,60. A pasta de cimento apresenta pequenos poros de ar incorporado que aparecem em forma esférica, possivelmente devido a uma má vibração do concreto, reduzindo bastante a resistência do concreto e aumentando sua permeabilidade.

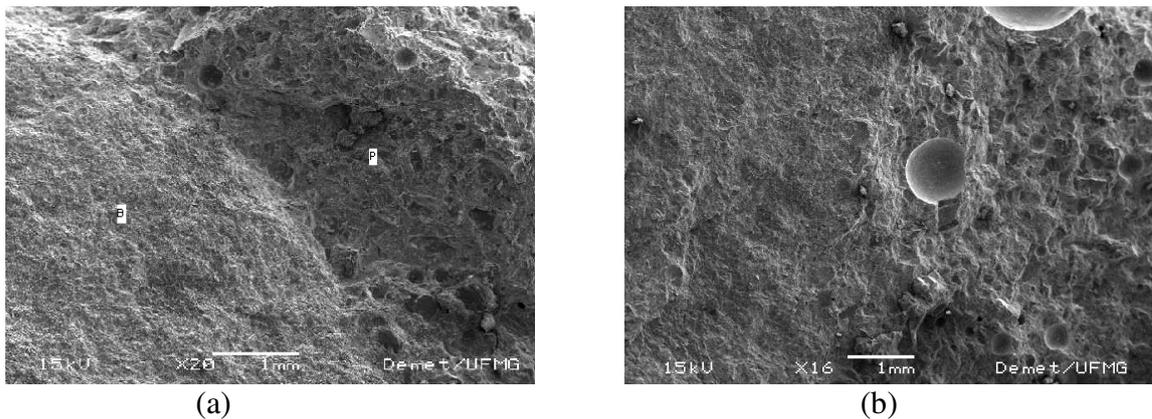
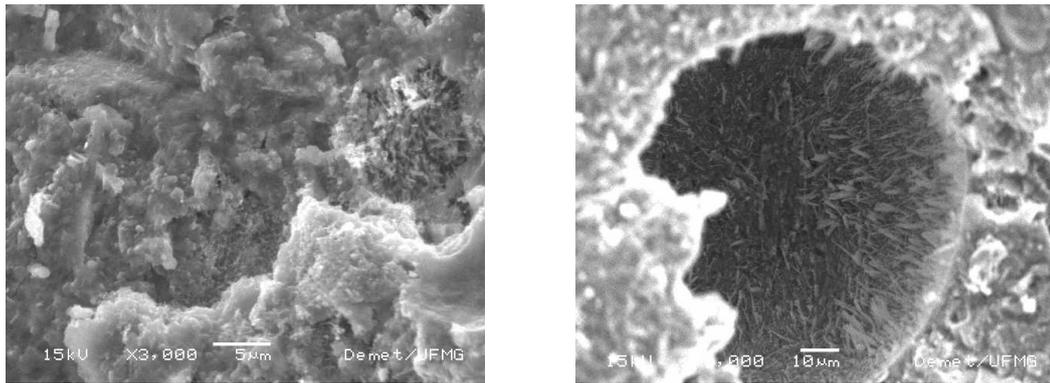


Figura 4.13 – Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto de referência com a/c de 0,60 . (a) P – pasta de cimento e B- brita.

As imagens obtidas por elétrons retro-espalhados são analisadas em tons de branco ao preto, sendo vários tons de cinza. O menor nível, ou seja, o preto representa os poros. Os grãos de cimento não hidratados aparecem em tons mais claros, já o cimento hidratado em um tom mais escuro. Os produtos hidratados encontrados na pasta de cimento endurecido consistem do gel de C-S-H e hidróxido de cálcio, acompanhados por menores quantidades de etringita e monossulfato. De acordo com Monteiro (1995), os grãos anidros de cimento possuem a coloração mais clara, o hidróxido de cálcio cinza claro, o C-S-H apresenta uma coloração cinza escuro e os vazios, coloração preta. A microscopia da figura 4.14 mostra a zona de transição pasta de cimento/brita com aumento de 3000X, apresentando os compostos hidratados do cimento representados pelos diferentes tons de cinza. As análises com elétrons secundários permitem observar a morfologia da estrutura cristalina das misturas de concreto. Aparecem na parte inferior da figura 4.14 (a) o hidróxido de cálcio em tonalidade cinza mais clara e o silicato hidratado de cálcio em tom mais escuro.

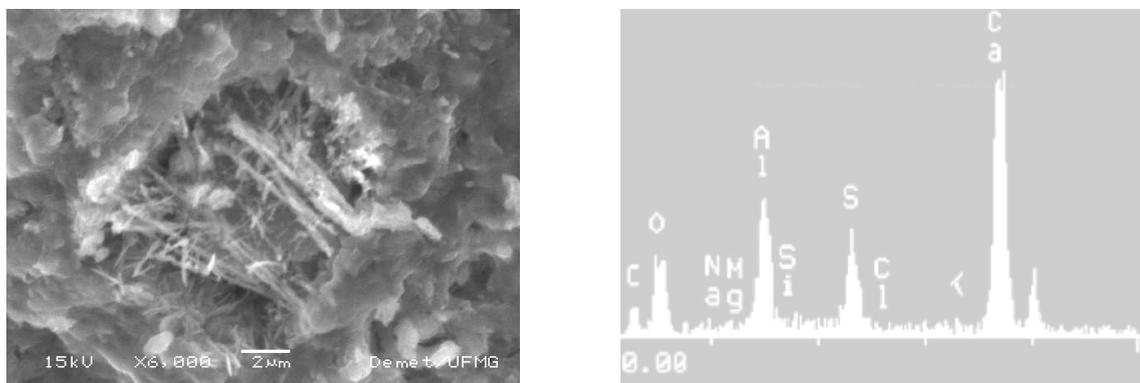


(a)

(b)

Figura 4.14 – Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto de referencia com a/c de 0,60.(a) vazio preenchido com cristais de monossulfato hidratado. (b) poros capilares (poros entre os produtos de hidratação do cimento), expansão de cristais

Mais a direita da figura 4.14 aparece um vazio preenchido por cristais de monossulfato hidratado ($C_3A_3S_3H_{24}$), com a forma de placas hexagonais delgadas, visualizado em detalhe na figura 4.15 com o espectrograma de raios X característico desse cristal.

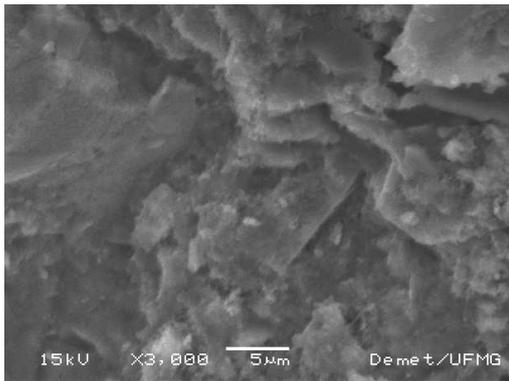


(a)

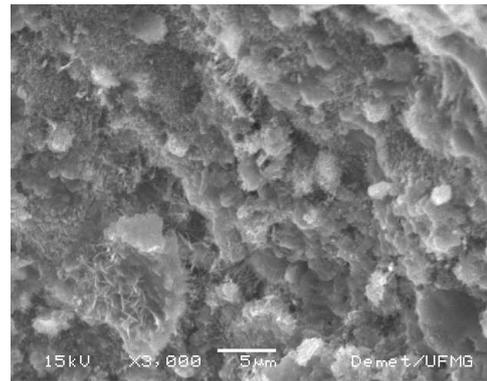
(b)

Figura 4.15 – Detalhe do vazio da microscopia da figura 4.13, mostrando o (a) preenchimento do vazio por cristais de monossulfato hidratado e o (b) espectrograma de raios X característico desse cristal.

A figura 4.16 mostra que a morfologia de pasta de cimento com de 10% de RPP apresenta um aspecto menos aberto e poroso, com poucos cristais orientados.



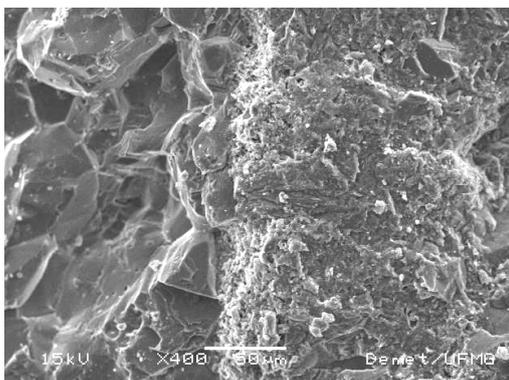
(a)



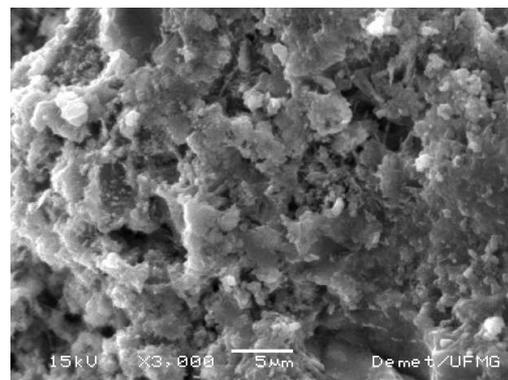
(b)

Figura 4.16 – Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto com 10% de RPP e a/c de 0,60. (a) imagem de elétrons retro-espalhados (b) imagem de elétrons secundários.

A microscopia da figura 4.17 (a) mostra uma estrutura compacta, com poucos vazios e poucos grãos de cimento anidro do concreto com 20% de RPP. A figura 4.17 (b) apresenta alguns vazios capilares na ordem de 4 μm que representam o espaço não preenchido pelos componentes sólidos da hidratação do cimento, mas que poderiam ser preenchidos pelos grãos do RPP.



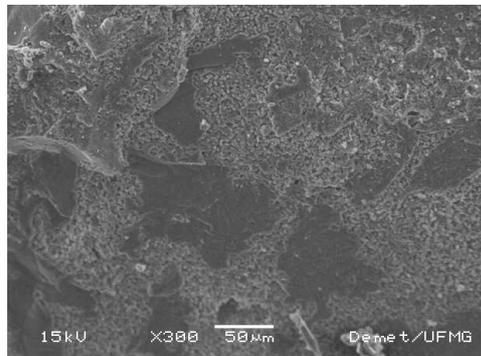
(a)



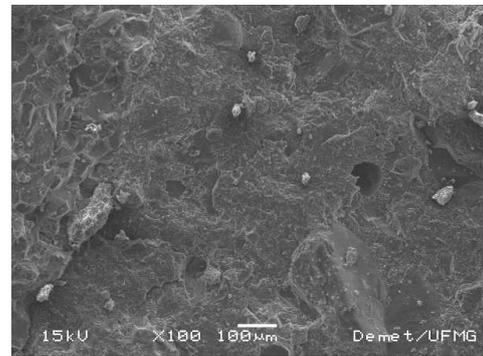
(b)

Figura 4.17– Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto com 20% de RPP e a/c de 0,60.

Figura 4.18 (a) e (b) observa-se uma vista geral da interface entre o agregado e a pasta de cimento, com um aumento de 300x e de 100x, respectivamente, as amostras se apresentam com uma pequena quantidade de vazios.



(a)



(b)

Figura 4.18– Zona de transição pasta de cimento e agregado do concreto com 20% de RPP e a/c de 0,60. (a) e (b) imagens obtidas por elétrons retro-espalhados.

5 – Conclusão

A reciclagem é de fundamental importância para a redução do impacto ambiental e vem mostrando ser uma alternativa interessante para utilização dos resíduos industriais no setor da construção civil, desenvolvendo materiais que atendam aos padrões técnicos, melhorando suas propriedades e não oferecendo riscos ao meio ambiente. Vários resíduos são usados na confecção de concretos, contribuindo com suas propriedades mecânicas e aspectos de durabilidade. É nesse sentido que esse trabalho procurou avaliar o comportamento de concretos produzidos com a adição do resíduo de polimento do piso porcelanato.

A partir dos resultados apresentados nesta pesquisa, são apresentadas as seguintes conclusões.

O resíduo originado do processo de polimento do piso porcelanato apresenta de forma geral, grãos irregulares e angulosos. De acordo com análise química, o RPP atende aos requisitos da NBR 12563 para ser considerado como uma pozolana, entretanto o resíduo apresenta uma estrutura basicamente cristalina, possuindo apenas uma pequena quantidade de sílica no estado amorfo. O diâmetro médio encontrado foi de 10,01 μm , sendo que 10% do resíduo está abaixo de 1,06 μm , 50% abaixo de 7,00 μm e 90% abaixo de 23,05 μm , confirmando ser um material bastante fino. O RPP, quando misturado com o cimento CPV, apresentou atividade pozolânica.

Referente às propriedades do concreto no estado fresco, as misturas de concretos com adição de resíduo de polimento de porcelanato apresentaram melhor consistência e uma menor exsudação. O aumento do teor de adição de RPP promoveu um aumento na coesão. A adição do RPP aumentou a viscosidade do concreto no estado fresco, opondo-se ao movimento descendente das partículas mais pesadas e ascendente da água, reduzindo, desta forma, a exudação.

Quanto à resistência à compressão axial, a adição de RPP melhorou o desempenho do concreto em relação ao de referência, para todos os teores. Os concretos com 10% de

adição obtiveram um ganho médio de 8,3%, enquanto que para os concretos com adição de 20% de RPP houve um aumento de 10,1% em relação ao concreto de referência considerando a idade de 3 dias. Para a idade de 28 dias, os concretos produzidos com 10% de RPP apresentaram um ganho de 5,1% em relação aos concretos de referência e os concretos com adição de 20% o aumento foi de 9%.

Já para a resistência à tração por compressão diametral os concretos com 10% de adição de RPP apresentaram melhor desempenho que os concretos com adição de 20% e os concretos de referência. Os concretos com 10% de adição obtiveram um ganho na resistência à tração por compressão diametral de 21,39% em relação aos concretos de referência, já os concretos com 20% esse ganho foi de 8,45%.

Quanto aos aspectos de durabilidade, foi constatado que a porosidade diminuiu com o aumento de teor de RPP. A porosidade foi de 15,63 % para os concretos de referência, de 14,01% para os concretos com 10 % de RPP e 10,35 % para os concretos com 20 %. O teor de adição de RPP mostrou-se muito influente na porosidade efetiva dos concretos. A resistência à compressão dos concretos é muito influenciada pela porosidade dos materiais que o compõe e pela porosidade da zona de transição.

O resíduo de polimento do porcelanato, considerando-se um teor de 10%, pode ser usado na confecção de concretos com um aproveitamento satisfatório de suas propriedades mecânicas e dos aspectos de durabilidade, desenvolvendo portanto, um material com melhor desempenho e contribuindo para a preservação do meio ambiente.

6.Referências Bibliográficas

ALI, M.M, MULLICK, A.K.; *Volume Stabilisation of High MgO Cement: effect of curing conditions and fly ash addition*. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1585–1594, 1998.

ALVIM, J. A. C. *Corrosão na armadura do concreto armado: influência dos agentes cloretos e da carbonatação*. Arquitetura & Design, 2002.

ANDRADE, N. P. H.; VEIGA, F. N. *Microscopia Eletrônica de Varredura*. Informativo Furnas Centrais Elétricas S.A, 1998.

ASH, J. E.; HALL, M. G.; LANGFORD, J. I.; MELLAS, M. *Estimations of Degree of Hidratation of Portland Cement Pastes*. Cement and Concrete Research, vol. 23, n.2, p.399-406, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregado para concreto*: NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – determinação da absorção e massa específica do agregado graúdo*: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – determinação da composição granulométrica*: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman*: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – determinação da absorção de água em agregados miúdos*: NBR 9777. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*: NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland comum*: NBR 5732. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*: NBR 6474. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos*: NBR 12142. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*: NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto fresco – determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico*: NBR 9833. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto fresco – perda de abatimento*: NBR 10342. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal*: NBR 5751. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Método de Determinação de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico*: NBR 5753. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

BATISTA LEITE, Mônica, DAL MOLIN, Denise ; *Avaliação da Atividade Pozolânica do Material Cerâmico Presente no Agregado Reciclado de Resíduo de C&D*, Sitientibus, Feira de Santana, n.26, p.111-130, jan./jun. 2002.

BAUER, E. *Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas - contribuição ao estudo da durabilidade das estruturas de concreto armado*. São Paulo. Tese (Doutorado) - PCC. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1995.

BITTENCOURT, E. L., BENINCÁ, E.; *Aspectos Superficiais do Produto Grês Polido*, Cerâmica Industrial, n°7, p.4, 2002.

BENSTED, J., MUNN, J., *The use of waste ceramic tile in cement production*. Cement and Concrete Research, n.31 p. 63, 2001.

CHAN, W. W. J.; WU, C. M. L. *Durability of concrete with high cement replacement*. Cement and concrete research n.30. pp. 865-879, 2000.

COSIN, S. A.C, SANTOS, H.S.; *Estudo por Difração de Raios- X das fases cristalinas formadas durante o aquecimento até 1250°C dos argilominerais componentes de Taguás da Região de Jarinú, Jundiá, Sp*; Proceedings of the 48^o Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society, Curitiba- PR, junho, 2004.

DIAMOND, SIDNEY. *The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer*. Cement & Concrete Composites, 2004.

EPAMINONDAS, L. F. J.; CAMARINI,G. *Análise de Imagens: um avanço para a tecnologia do concreto*. UNICAMP, pp.18, 2004.

GONÇALVES, Jardel Pereira – Dissertação de Mestrado - *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como Adição para produção de Concretos*. Porto Alegre, Dezembro/2000.

GRIGOLI, Ademir Scobin - HELENE, Paulo. *Comportamento das Adições Mineraias Inertes em Poros e Zona de Transição em Concretos*. II Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá - Paraná, 2001.

GARBOCZI, E.J. *Permeability, Diffusivity and Microstructural Parameters: a Critical Review*. Cement Concrete Research, 1990.

GUEDERT, L. O., *Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza de casca de arroz como material pozolânico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. UFSC. Florianópolis, pp. 147, 1989.

GRIM, R. E. *Propriedades de Argilas*, Cerâmica n^o 9, pp. 35, p.18, 1963.

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. *Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria*. In: Workshop Sobre Reciclagem e

Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção, 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo: EPUSP/ANTAC, 170 p. pp.107–115, 1997.

HELENE, P. R. L. *Envelhecimento das superfícies de concreto aparente e produtos de proteção, In: Reparos, reforços e proteção das estruturas de concreto*. Anais. EPUSP-PCC. São Paulo. SP. 1989.

HELENE, Paulo R. L. *Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto Armado* São Paulo tese (Livre Docência) Escola Politécnica.pp.241,1993.

HELENE, P.R.L.;TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, pp.349, 1992.

HOEL, PAUL GERHARD. *Estatística Elementar*. São Paulo, Editora Fundo de Cultura S.A., 1968.

HUNKELER, F. *The Resistivity of Pore Water Solution a Decisive Parameter of Rebar Corrosion and Repair Methods*. Constructions and Building Materials,1996.

ISAIA, G.C., GASTALDINI A.L.G., MORAES, R.; *Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concret*. Cement & Concrete Composites 25, pp.69–76, Santa Maria, RS, Brazil, 2003

JOHN, V. M. *A construção e o meio ambiente*.
<http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>. 1998.

JOHN, V. M. *Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar*. <http://www.recycle.pcc.usp.br/artigos1.htm>. 1998.

KIHARA, Y., O estudo das cinzas volantes brasileiras, *Cerâmica*, 32 (193), pp. 31-38, 1986.

KAEFER, Luis Fernando – *Considerações sobre a Microestrutura do Concreto*.

<http://www.pcc.usp.br/artigos1.htm>, 2003.

KELHAM, S. A, *Water Absortion test for concrete*. Magazine of Concrete Research, v. 40, nº 10. Junho,1988, p. 106 – 110.

LEA, F. M., *The Chemistry of Cement and Concrete*, Chemical Publishing Company, Inc., New York, 1971, pp. 302-10, 414-89

MANSUR, H.S; *Caracterização de Superfície e Interfaces*. Notas de aula. CPGEM UFMG.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo, Ed. Pini, p.573, 1994.

MEHTA, P. K., *Influence of fly ash characteristics on the strength of Portland fly ash mixtures*, Cement and Concret Research, 1985, 15, Nº 4, pp 669-74

MELO NETO, Antônio Acacio de, *Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada*. Dissertação de mestrado, 161pp. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

MONTEIRO, P.J.M., *The aggregate-mortar interface*, Cement and Concret Research , 15, n. 6, pp.953-8, 1985.

MIELLENZ, R.C., *Materials for pozzolan, a report for the engeneering geologist*, Petrog. Dept. Rep. 90-B, pp. 20, U.S Bureau of Reclamation, 1950.

M. O'Farrell, S., *Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar*, Cement and Concrete Research 23, pp.89-91, 2000.

<http://www.elsevier.com/locate/cemconcompl>

NEVILLE, A. M., *Propriedades do Concreto*, Editora Pini, 2° ed., pp.828, 1997.

OLLIVIER, J. P., *Durability of concrete*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Construção Civil, BT/PCC/192. 129p. São Paulo. 1998.

PAIVA, ANTONIO FABIANO DE. *Estatística volume 2*. Imprensa UFMG, 1982.

PIERCE, FRED. *Cimento ecológico pode reduzir efeito estufa*. New Scientist, p.151-153, 2002.

POPOVICS, S. – *Concrete – Making Materials* – Hemisphere Publishing Corporation. Washington DC., 1979.

POWER, T. C., *The Properties of Fresh Concret*, Jonh Wiley & Sons, Inc. New York, 1968.

RIGO, Cláudio Alberto da Silva, Tese de Doutorado, *Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia para Caracterização e Análise Estrutural de Concretos de Cimento Portland*, CPGEM, UFMG, 1998.

RODRIGUEZ, ADRIANO MARTIN; PIANARO, SIDNEI ANTÔNIO. *Propriedades de Matérias-primas Seleccionadas para a Produção de Grês Porcelanato*. Cerâmica Industrial, n° 9, pp.6, 2004.

SABIR, B.B., WILD, J.B. *Metakaulin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review*. Cement and concrete research n.23. pp.454 – 451, 2001.

SANCHEZ, E. M.J. Orts, GARCÍA-TEN e V.CANTAVELLA, *Efeito da Composição das Matérias-Primas Empregadas na Fabricação de Porcelanato sobre as Fases Formadas durante a Queima e as Propriedades do Produto final*. Cerâmica Industrial, Setembro / Outubro, 2001.

SANTOS, PÉRCIO DE SOUZA. *Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras*. Ed. Universidade de São Paulo, Vol.2, 1975.

SHARMA, R.L.; PANDEY, S.P.; *Influence of Mineral Additives on The Hydration Characteristics of Ordinary Portland Cement*, Cement and Concrete Research 29, 1999.

VASCONCELOS, W.L; PEREIRA, M. M; *Processamento de Cerâmicas, Notas de aula*, CPGEM, p.94, 2004.

WINKLER, A.; MÜELLER, H. A. *Recycling of fine processed building rubble materials*. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. London: Thomas Telford Pub., pp.157-168, 1998.

WINSLOW, D. N.; COHEN, M. D. *Percolation and pore structure in mortars and concrete*, Cement and Concrete Research, v.24, pp.25-37. 1994.

ZORDAN, S. E. *Entulho da indústria da construção civil*.

<http://www.recycle.pcc.usp.br/fichatécnica.htm>. 2000 (acessado em agosto de 2004).

Anexo 1: Metodologia Usada para as determinações analíticas

SiO₂ – gravimetria, desidratação com ácido perclórico,

Al₂O₃ – digestão por fusão alcalina, determinação por espectrometria de Absorção Atômica,

Fe₂O₃ - digestão por fusão alcalina, determinação por espectrometria de Absorção Atômica,

CaO - digestão por fusão alcalina, determinação por espectrometria de Absorção Atômica,

MgO - digestão por fusão alcalina, determinação por espectrometria de Absorção Atômica,

Na₂O – digestão ácida, por microondas, determinação por espectrometria de absorção Atômica,

K₂O - digestão ácida, por microondas, determinação por espectrometria de absorção Atômica,

P₂O₅ - digestão ácida, determinação por espectrometria de absorção molecular,

SO₃ – combustão direta, com detecção por infravermelho, equipamento CS 244 – Leco,

Sn - Digestão por fusão alcalina, determinação por espectrometria de Absorção Atômica,

Pb - Digestão por fusão alcalina, determinação por espectrometria de Absorção Atômica,

Mn - Digestão por fusão alcalina, determinação por espectrometria de Absorção Atômica,

PPC – queima, a 950°C, até peso constante.