

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL EM CONCRETOS PREPARADOS
COM CALCÁRIO DE ALTA RESISTÊNCIA**

Eduardo da Cruz Teixeira

**Campina Grande-PB
Agosto/2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL EM CONCRETOS PREPARADOS
COM CALCÁRIO DE ALTA RESISTÊNCIA**

Eduardo da Cruz Teixeira

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais como requisito parcial à
obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

Orientador: Dr. Gelmires de Araújo Neves

Co-orientador: Dr. Ulisses Targino Bezerra

Agência Financiadora: CNPq

Campina Grande

Agosto/2012



DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

T266a Teixeira, Eduardo da Cruz.
 Análise macro e microestrutural em concretos preparados com calcário de alta resistência / Eduardo da Cruz Teixeira. - Campina Grande, 2012.
 66f.: il., color.

 Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –
 Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
 Orientadores: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves, Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra.
 Referências.

 1. Concreto. 2. Calcário de Alta Densidade. 3. Agregados. I. Título.

CDU 691.32 (043)

**ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL EM CONCRETOS PREPARADOS
COM CALCÁRIO DE ALTA RESISTÊNCIA**

Eduardo da Cruz Teixeira

Dissertação aprovada em 31 de agosto de 2012, pela banca examinadora
constituída dos seguintes membros:

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Orientador

UAEMa - UFCG



Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra

Co-Orientador

IFPB



Prof. Dr. Romualdo Rodrigues Menezes

Examinador Interno

UAEMa – UFCG



Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

Examinador Externo

LABEME – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido e saudoso Tio, **Cícero da Cruz Santana**.

VITAE DO CANDIDATO

- Tecnólogo em Construção de Edifícios pelo IFPB (2008).
- Especialização em Gerenciamento de Obras, Tecnologia e Qualidade na Construção pelo IPOG (em andamento).
- Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFCG (2012)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, que sempre me deu forças para ajudar moderadamente a ciência encontrar seus caminhos da verdade e me encontrar como mera criatura, por meio desses caminhos.

A minha mãe, que sempre valorizou a importância dos estudos na formação intelectual e social do indivíduo.

Maria da Cruz Teixeira.

Ao meu Pai, que por meio de poucas palavras e muitas atitudes, realiza lições.

João Teixeira de Sousa Neto.

A minha namorada, que pacientemente, sempre acreditou e participou definitivamente na minha perseverança e conclusão deste trabalho.

Juliana de Oliveira Castelo Branco.

Ao meu Co-Orientador, Doutor no título, Mestre na essência.

Ulisses Targino Bezerra.

Ao meu Orientador, paciente nos pensamentos, sábio nas palavras e preciso na orientação.

Gelmires de Araújo Neves.

Ao Professor, que se comporta como companheiro do indivíduo e da ciência.

Heber Sivini Ferreira.

A Professora, que, sem obrigação nenhuma, exercitou sua vocação: passar conhecimento.

Andressa de Araújo Porto Vieira.

Ao Professor, que nos ajudou definitivamente na realização dos ensaios de MEV e participou das bancas de avaliação do mestrado.

Romualdo Rodrigues Menezes.

Ao Laboratório, muito mais que o espaço físico, mas, todos os indivíduos que nele trabalham com dedicação e profissionalismo.

LABEME - UFPB (Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas)

Ao **Professor Geraldo** que auxiliou nos ensaios de pH das soluções utilizadas na pesquisa no Laboratório de Análise Química do IFPB.

A doutoranda e técnica do Laboratório de Caracterização de Materiais, que auxiliou nos ensaios de DRX na UFCG.

Juliana Melo.

A agência financiadora, que vem mantendo seu importante papel no desenvolvimento científico do País, em busca, não só, do desenvolvimento e aperfeiçoamento da ciência, mas, principalmente, do cientista.

CNPq.

A todos meus familiares e amigos que participaram de maneira direta ou indiretamente na formação deste trabalho.

ANÁLISE MACRO E MICROESTRUTURAL EM CONCRETOS PREPARADOS COM CALCÁRIO DE ALTA RESISTÊNCIA

RESUMO

A compreensão da microestrutura dos concretos oferece subsídios e ferramentas para melhoria de suas propriedades, principalmente durabilidade e resistência mecânica. Sendo assim, este projeto direciona sua pesquisa numa análise macro e microestrutural em concretos preparados com calcário de alta densidade do cariri cearense. Uma análise comparativa com os concretos preparados com brita granítica e calcário de baixa densidade foi realizada como objetivo secundário. Foram preparados corpos de prova com 35 mm de diâmetro e 70 mm de altura no traço 1:2:2:0,5. No concreto convencional foi utilizada brita granítica como agregado graúdo e os alternativos foram preparados com calcários de alta e baixa densidade. Em seguida os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de: DRX, para identificação das fases dos materiais constituintes dos agregados utilizados, FRX para identificação dos elementos químicos dos agregados, ensaio de resistência à compressão dos concretos, ensaios de pH, massa específica real e MEV das amostras dos concretos para análise da zona de transição. Os dois tipos de calcários de alta densidade encontrados nas jazidas no cariri cearense apresentaram em sua composição química o CaO predominando em 73% para o calcário branco e 65% para o calcário cinza, porém o tipo cinza apresentou em sua composição 4,5% de sílica contra apenas 1,84% encontrado no tipo branco. Os concretos preparados com calcário de alta densidade apresentaram resistência à compressão em média 16% maior que os concretos convencionais. As micrografias obtidas no MEV mostraram uma zona de transição com pouca ocorrência de fissuras ou fraturas e pouca porosidade nos concretos preparados com calcário, já nos preparados com brita granítica foram encontradas fissuras ao longo de sua interface e porosidade acentuada.

MACRO AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS IN CONCRETE PREPARED WITH HIGH STRENGTH CALCAREOUS

ABSTRACT

The understanding of the microstructure of concrete offers subsidies and tools to improve their properties, specially durability and mechanical resistance. Thus, this project directs its research in a macro and microstructural analysis in concrete prepared with high density limestone of the Ceara's cariri. A comparative analysis with the concrete prepared with crushed granite and low density limestone was performed with secondary aim. Specimens were prepared with 35 mm diameter and 70 mm height on the dash 1:2:2:0,5. In the conventional concrete was used crushed granite as coarse aggregate and the alternatives were prepared with high and low density limestone. Then the specimens were subjected to the tests: XRD for phase identification of the constituent materials of the aggregates that were used, XRF to identify the chemical elements of aggregates, strength testing for the concrete compression, pH testing, real specific mass and SEM of the concrete samples for analysis of transition zone. The two high density concrete kinds found in the field in the Ceara's cariri presented on their chemical composition the CaO predominating in 73% to white limestone and 65% to the grey limestone, however the grey type presented 4,5% of silica in its composition against only 1,84% found in the white type. The concretes prepared with high density limestone presented on average 16% higher resistance to compression than the conventional concretes. The micrographs obtained in the SEM showed a transition zone with low occurrence of cracks or fractures and low porosity in the concretes prepared with limestone, on the other hand on those prepared with crushed granite were found cracks along its interface and high porosity.

SUMÁRIO

	Pág.
AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
SUMÁRIO	v
ÍNDICE DE TABELAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xi
1. INTRODUÇÃO e OBJETIVOS	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Concreto.....	4
2.1.1 Breve histórico.....	5
2.1.2 Características gerais.....	6
2.1.3 Agregados	11
2.1.4 Avanços tecnológicos do concreto	14
2.1.5 Microestrutura do concreto.....	15
2.1.5.1 Fase matriz.....	17
2.1.5.2 Fase zona de transição.....	21
2.2 Rocha calcária.....	25
2.2.1 Calcário de alta densidade do Cariri Cearense.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1. Materiais.....	33

3.2. Métodos.....	36
3.2.1 Preparação para DRX, FRX, pH, massa específica e absorção.....	36
3.2.2 Preparação para MEV	38
3.2.3 Preparação para ensaios de resistência.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1. DRX dos agregados.....	42
4.2 Composição química dos agregados.....	44
4.3 pH dos agregados	46
4.4 Massa específica e absorção dos agregados	47
4.5 Resistência mecânica dos agregados	47
4.6 MEV dos concretos (zona de transição)	48
4.6.1 Zona de transição do concreto preparado com CBD	48
4.6.2 Zona de transição do concreto preparado com CADC	52
4.6.3 Zona de transição do concreto preparado com CADB	54
4.6.4 Zona de transição do concreto preparado com BRITA	57
5. CONCLUSÕES	61
6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE TABELAS

	Pag.
Tabela 1 – Características de alguns tipos de rochas	12
Tabela 2 – Propriedades físicas dos minerais carbonatados	27
Tabela 3 – Materiais utilizados nos corpos de prova	35
Tabela 4 – Composição química das amostras	45
Tabela 5 – Classificação das rochas em relação à quantidade de SiO ₂ ...	46
Tabela 6 – Massa específica e absorção dos agregados	47
Tabela 7 – Resistência mecânica dos concretos	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1 – Imagem dos componentes macroscópicos do concreto	7
Figura 2 – Etapas de hidratação de uma partícula de cimento	10
Figura 3 – Dimensões dos componentes existentes na microestrutura do concreto	16
Figura 4 – Imagem do concreto, ampliação 110x, com as fases da microestrutura	17
Figura 5 – Imagem dos cristais de C-S-H no concreto	19
Figura 6 – Morfologia dos cristais de C-S-H no concreto com 2 semanas de hidratação	19
Figura 7 – Morfologia dos cristais de CH no concreto	20
Figura 8 – Imagens dos cristais: 1 = C-S-H; 2 = CH; 3 = vazio capilar	21
Figura 9 – Ilustração da exsudação interna e externa	22
Figura 10 – Ruptura do concreto na zona de transição, escala em 1µm	23
Figura 11 – Representação esquemática da zona de transição do concreto	24
Figura 12 – Interface da pasta/agregado de um concreto de elevado desempenho, escala em 10 µm	25
Figura 13 – Imagem ilustrativa do mapa do Ceará, focando a região do Cariri cearense	29
Figura 14 – Perfil geológico esquemático de jazida de calcário	31
Figura 15 – Jazida de calcário de alta densidade, Farias Brito – CE	33
Figura 16 – CADB (calcário de alta densidade branco); CADC (calcário de alta densidade cinza).....	34
Figura 17 – CBD (calcário de baixa densidade); BRITA (brita granítica) ...	34
Figura 18 – Corpo de prova utilizado na pesquisa	35
Figura 19 – Difratômetro de raios x. Modelo SHIMADZU 6000	37
Figura 20 – Amostra do concreto cortada em dimensões 1,0 cm x 1,0 cm, com 0,5 cm de espessura	39
Figura 21 – Microscópio Eletrônico de Varredura	40

Figura 22 – Corpo de prova utilizado para ensaio de resistência mecânica	41
Figura 23 – DRX do calcário de alta densidade branco	42
Figura 24 – DRX do calcário de alta densidade cinza	43
Figura 25 – DRX do calcário de baixa densidade	43
Figura 26 – DRX da brita granítica	44
Figura 27 – Gráfico dos elementos químicos dos agregados	45
Figura 28 – Gráfico das medições do pH das amostras por 45 dias	46
Figura 29 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x100).....	49
Figura 30 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x500).....	49
Figura 31 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x1000).....	50
Figura 32 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x5000).....	50
Figura 33 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x100).....	52
Figura 34 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x500).....	52
Figura 35 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x1000).....	53
Figura 36 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x5000).....	53
Figura 37 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x100).....	55
Figura 38 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x500).....	55
Figura 39 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x1000).....	56
Figura 40 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x5000).....	56

Figura 41 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x100).....	58
Figura 42 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x500).....	58
Figura 43 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x1000).....	59
Figura 44 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x5000).....	59

SÍMBOLOS E ABREVIações

μm - micrômetro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CADB – Calcário de Alta Densidade Branco

CADC – Calcário de Alta Densidade Cinza

Cal – calorias

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio

CBD – Calcário de Baixa Densidade

CH – Hidróxido de Cálcio

cm – Centímetro

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

C-S-H – Slicato de Cálcio Hidratado

C₃S – silicato tricálcio

C₃S₂H₃ – Bissilicato Tricálcio

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX – Difração de Raios X

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FRX – Fluorescência de Raios X

g - grama

H - Hidrogênio

IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

IPOG – Instituto de Pós-Graduação

LABEME – Laboratório de ensaios de materiais e estruturas

LSR (Laboratório de Solidificação Rápida)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

mm – milímetros

NM – Norma Mercosul

pH – Potencial hidrogeniônico

UAEMa – Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este trabalho trata de uma pesquisa de análise no material mais importante na Indústria da Construção Civil, o concreto, devido ao seu grande volume empregado em comparação aos outros materiais, no que concerne análise das propriedades macro e microestruturais.

A Ciência e Engenharia de Materiais é um importante vetor científico no estudo e aperfeiçoamento em todos os materiais utilizados pelo homem, não pode ser diferente com os materiais da Construção Civil, sobretudo o próprio concreto, que culturalmente, ainda tem um processo de fabricação artesanal, necessitando de aperfeiçoamento de suas propriedades gerais.

O concreto é usado pela humanidade há muito tempo, desde os tempos dos romanos, pois foi nessa época e no oriente que se iniciou a ideia de fazer uma pasta que, ao endurecer, se transformava em uma pedra artificial. Foi nessa época também que começou o desenvolvimento da interação de dois materiais distintos, as barras de bronze dentro da argamassa de pozolana, conforme Vasconcelos (2002), dando início ao conceito preliminar de concreto armado.

De acordo com Brunauer e Copeland (1964), citados por Mehta e Monteiro (2008), o concreto é o elemento mais utilizado pela construção civil, como também o mais usado pela humanidade, ficando atrás somente da água, o mesmo é normalmente feito da mistura de cimento Portland, areia, pedra e água. Mehta e Monteiro (2008) explicam ainda que nos últimos anos, a utilização do concreto está crescendo, em uma média de 5,5 bilhões de toneladas por ano.

O concreto é considerado como um material compósito pelo fato de ser formado por dois ou mais tipos de materiais de natureza e propriedades distintas com finalidade de formar um material resultante com propriedades aperfeiçoadas. Segundo Neville (1997), o concreto de cimento Portland é um material poroso, heterogêneo e complexo, na sua microestrutura existem dois constituintes principais: a pasta de cimento endurecido e os agregados, basicamente o concreto simples é formado pela mistura de cimento, areia, brita e água. Porém, Farran (1956), em seus estudos comprovou a existência de outra fase, a zona de transição.

Os estudos científicos que abordam o aperfeiçoamento do concreto devem levar em consideração a relevância da sua microestrutura, essa, segundo

Monteiro (1993), tem relação direta com a melhoria das propriedades gerais do material.

Pesquisas mostram e comprovam essa relação entre a microestrutura do concreto e suas propriedades, principalmente na zona de transição, interface entre a pasta de cimento e o agregado, considerada como a parte limitante da resistência mecânica do concreto, segundo Mehta e Monteiro (2008). Ainda conforme estes autores, a identificação e o comportamento das fases constituintes do concreto em sua microestrutura oferecem possibilidades de mecanismos capazes de aperfeiçoar as propriedades gerais do mesmo de uma maneira geral.

Estudos desenvolvidos por Kaefer (2002) mostram que porosidade e heterogeneidade em relação ao restante da pasta são as características da zona de transição, além de ser pobre do composto C-S-H (silicato cálcico hidratado), estrutura parcialmente cristalina responsável pela resistência mecânica do concreto.

Para entender a relação entre as propriedades físicas do concreto e a sua microestrutura, é necessário ter acesso: (i) à diversidade da morfologia e suas características, (ii) à sua heterogeneidade principalmente após a modelagem da microestrutura, (iii) sua evolução a partir de modelos probabilísticos, e (iv) à “qualidade” da interface entre grãos ou fases dos pontos a partir da estrutura química ou física visualizada. A análise das imagens obtidas pela microscopia óptica é adequada para investigar o primeiro aspecto, a microscopia eletrônica de varredura é adequada para investigar os primeiros três aspectos, e a microscopia de transmissão de elétrons a quarta (CHERMANT, 2001). Este trabalho utilizou análise da microestrutura do concreto utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura.

A análise microestrutural do concreto foi realizada especificamente na zona de transição, para verificação das formações morfológicas.

O agregado utilizado pela pesquisa, substituindo o agregado graúdo convencional de nossa região, foi o calcário de alta resistência e densidade. A análise macroestrutural trata do comportamento dos concretos preparados com os agregados citados no que tange principalmente a resistência mecânica.

Na região do Cariri Cearense, especificamente na cidade de Farias Brito, encontram-se algumas jazidas desse material estudado, que ultimamente vem sendo explorado em grande escala em toda região para produção de cal para construção civil, onde foram coletadas *in loco* amostras para a pesquisa, conhecido como calcário do Cariri Cearense.

O calcário sedimentar, utilizado na pesquisa, da Chapada do Araripe, situada no sul do Estado do Ceará, formado essencialmente de carbonato de cálcio, é utilizado, geralmente, como rochas ornamentais em forma de lajotas, conhecidas comercialmente como Pedra Cariri.

O objetivo principal deste trabalho foi fazer uma análise macro e microestrutural do concreto preparado com calcário de alta resistência como agregado graúdo.

Os objetivos específicos foram:

- a) Caracterização das matérias primas;
- b) Comparação da microestrutura dos concretos preparados com os agregados distintos, especificamente na zona de transição; e
- c) Análise da resistência à compressão dos concretos preparados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) 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.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que o concreto é definido como um material compósito, que consiste de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregado, sendo o aglomerante a mistura de cimento e água, no caso de concreto de cimento hidráulico.

De acordo ainda com Mehta e Monteiro (2008), comparado com outros materiais, a estrutura do concreto não é uma propriedade estática nem uniforme. Isto se dá porque dois dos três componentes da estrutura – a pasta de cimento e a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento – continuam a se modificar com o tempo, além de depender das condições de preparo e cura do concreto. A resistência e outras propriedades do concreto dependem dos produtos de hidratação do cimento, que continuam a se formar por muitos anos. Embora os produtos sejam relativamente insolúveis podem se dissolver vagarosamente e se recristalizar em ambientes úmidos, permitindo que o concreto sele suas microfissuras e mude ligeiramente de comportamento.

Componente bastante importante do concreto é o agregado que, segundo Kaefer (2002), as suas formas miúda e graúda são obtidas diretamente da natureza (areia e brita) ou ainda reaproveitando rejeitos industriais e urbanos, como a escória de alto forno e concreto reciclado originado de demolições.

Segundo Melo e Liborio (1998), a areia tem importância na qualidade de argamassa, assim, o agregado a ser utilizado deve permitir que a argamassa atenda às exigências de trabalhabilidade, produtividade, textura, acabamento e adequação à decoração final e ao uso, esses autores explicam ainda que a granulometria do agregado pode influenciar na dosagem do aglomerante e na quantidade de água da mistura. Desta forma, quando há deficiências na

granulometria ou excesso de finos, ocorre um maior consumo de água de amassamento, alterando as propriedades mecânicas e causando maior retração por secagem.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que o concreto, como dito anteriormente, é constituído por cimento (agente aglomerante), agregados, aditivos e água, sendo o cimento o material que mais interfere nos processos físicos e químicos que influenciam na sua durabilidade, como por exemplo, a estrutura porosa do concreto e a quantidade de água o que se chama de relação a/c, que é a razão aonde a quantidade de água e com a quantidade de cimento a serem incorporadas na mistura.

2.1.1 Breve Histórico

O concreto surgiu com o desejo de se criar um material que tivesse o comportamento de uma pedra artificial, resistente, econômico e durável como as rochas naturais (JOUKOSKI, 2001).

Segundo Kaefer (2002), o concreto foi usado na construção dos muros de uma cidade romana no século IV a.C., situada a 64 km de Roma e no século II a.C. este novo material começou a ser usado em edificações em Roma, dando início a uma cadeia de utilização e desenvolvimento.

Infelizmente, a literatura julga desconhecer o início do concreto armado no Brasil, sabe-se apenas que sua expansão nacional deu-se durante a Revolução Industrial, antes era denominado de Cimento Armado.

Explica Vasconcelos (2002) que na década de 30 o país se encontrava no berço do desenvolvimento da construção civil, conseqüentemente, no desenvolvimento do concreto, é tão certo que em setembro na década de 40, foi fundada a conhecida e importante ABNT, que atualmente atua na normatização de vários setores da Indústria.

A partir da década de 40, então, a evolução ocorrida nas características mecânicas dos concretos vem também acompanhada de uma evolução positiva nas suas demais propriedades, sobretudo as relacionadas à durabilidade, que vêm conseguindo resistências mais elevadas, produzindo-se o chamado concreto de alta resistência.

Segundo Silva (2000), uma das principais aplicações do concreto de alta resistência na construção civil têm sido em edifícios altos, pavimentos de rodovias, pisos industriais e obras de arte.

2.1.2 Características Gerais

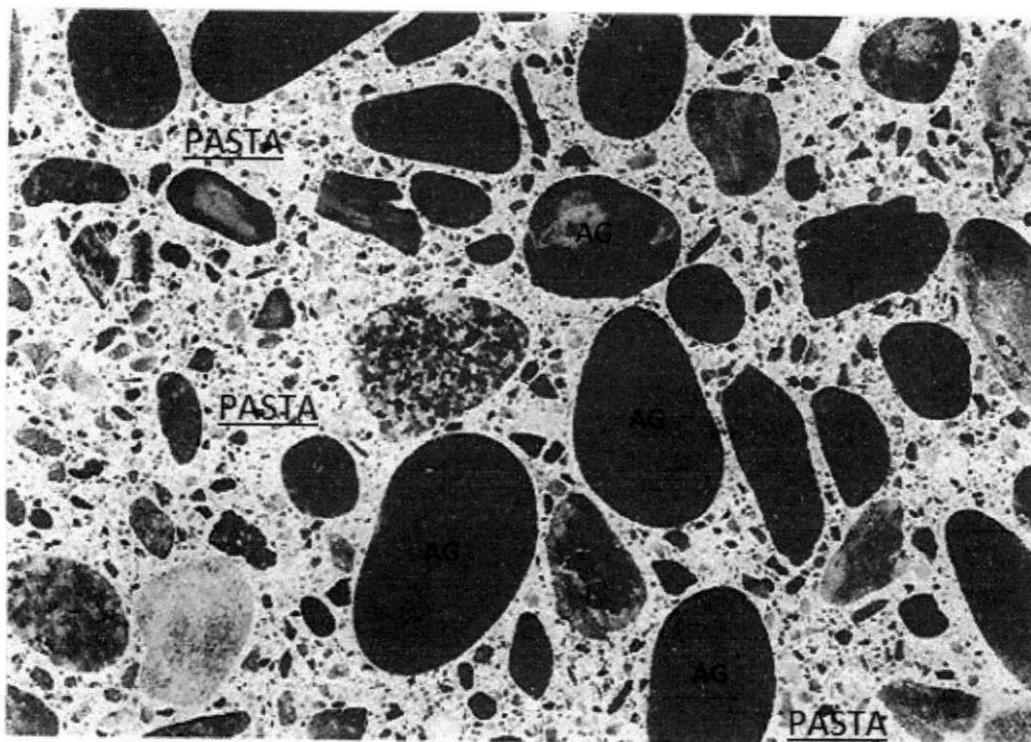
A pasta é a mistura do cimento hidráulico com o agregado miúdo e/ou aditivos, o agregado graúdo é uma fase diferente, devido à forma e tamanho diferencial.

A pasta e o agregado além de serem fases distintas, apresentam características também distintas, considerando o agregado graúdo como inerte quimicamente, a durabilidade do concreto depende da pasta e da zona de transição (pasta/agregado graúdo) e da coesão entre eles.

Analisando sua macroestrutura (Figura 1), identificam-se dois constituintes principais: a pasta de cimento endurecida e as partículas de agregado do concreto. Por outro lado, analisando sua microestrutura, distingue-se que a pasta de cimento em contato com o agregado graúdo (em uma espessura de 10 μm a 50 μm) possui características diferentes do restante da pasta, podendo ser considerada mais um componente do concreto.

Figura 1 – Imagem dos componentes macroscópicos do concreto.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).



Contudo, a obtenção de um concreto com qualidade requer uma série de cuidados. Esses cuidados englobam desde a escolha de materiais, a determinação de um traço que garanta a resistência e a durabilidade desejadas, passando pela homogeneização da mistura, sua correta aplicação e adensamento, até a cura adequada, a qual garantirá a perfeita hidratação do cimento.

O sucesso de uma construção depende, em grande parte, da correta definição do tipo de concreto a ser utilizado. Para isso devem ser analisadas suas propriedades e características próprias dos vários tipos de concreto utilizados na engenharia, dentre elas: concreto leve, aparente, pré-moldado, protendido, rolado, submerso, magro, alto desempenho (CAD), entre outros.

O CAD, mencionado anteriormente, é um fruto do aperfeiçoamento da tecnologia do concreto, baseado em dois objetivos principais, durabilidade e resistência, para alcançar um melhoramento significativo neste material, deve-se concentrar na otimização de um processo químico característico nos concretos, a hidratação.

A hidratação dos compostos da pasta do concreto é, quimicamente, um processo muito complexo em que várias reações de hidratação ocorrem simultaneamente, em diferentes velocidades, interferindo umas nas outras, porém esta é uma etapa muito importante do concreto, que na verdade é o seu princípio fundamental, especificamente dos compostos encontrados no cimento e nos agregados e/ou aditivos a serem utilizados.

Silva (2002) explica que de imediato após o contato direto do cimento com a água, por dissolução-precipitação, inicia-se uma troca iônica entre os sólidos e a fase líquida. A solubilidade elevada de alguns compostos do cimento leva a um rápido aumento da concentração dos aluminatos de cálcio, sulfatos e álcalis na fase líquida. Deve-se ressaltar que as reações de hidratação do cimento Portland são influenciadas pela finura do mesmo, pela temperatura na qual se desenvolvem as reações e pela composição do clínquer utilizado.

Este conjunto de reações acontece, resumidamente, em cinco etapas, sendo eles segundo Scrivener (2004):

Etapa 1: nos primeiros minutos ocorre essencialmente a reação da água com: (i) o aluminato tricálcico (C_3A) e o gesso (S), formando-se cristais curtos de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt); e (ii) o silicato tricálcico (C_3S) formando-se um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) – que se deposita na superfície da partícula de cimento – e hidróxido de cálcio (CH) – que se precipita nos espaços entre as partículas com um hábito hexagonal;

Etapa 2: prossegue a reação da água com os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), formando-se uma camada adicional de C-S-H em torno da partícula de cimento a uma distância de cerca 1 μm , que se designa correntemente por “C-S-H exterior”;

Etapa 3: ocorre uma reação de hidratação secundária dos aluminatos de cálcio (C_3A e C_4AF) formando-se compostos aciculares longos de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt). O C-S-H que se começa a formar nesta etapa designa-se por “interior” uma vez que, devido à mobilidade progressivamente mais reduzida dos produtos das reações, se deposita dentro da camada de hidratação formada nas etapas anteriores;

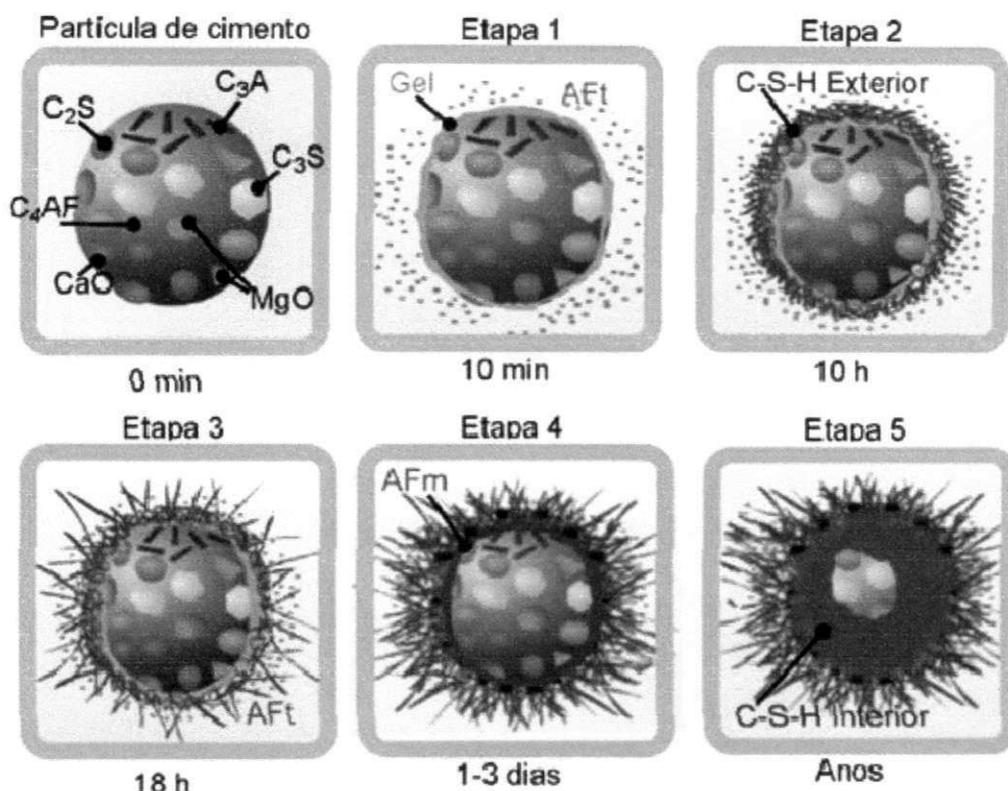
Etapa 4: a hidratação prossegue a uma velocidade lenta, correspondente a reações em estado sólido. Continua a formar-se “C-S-H interior”, com diminuição progressiva do espaço livre entre a camada de hidratação e a partícula não hidratada, e aparece uma nova fase de aluminato, mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm);

Etapa 5: as reações de hidratação decorrem ao longo de vários anos, continuando essencialmente a formar-se “C-S- H interior” adicional.

A Figura 2, a seguir, ilustra, resumidamente, as cinco etapas de hidratação das partículas de cimento descritas por Scrivener (2004), de acordo com o passar do tempo, em minutos, dias e em anos, assim como a identificação dos principais compostos químicos encontrados no período de hidratação e suas reações.

Figura 2 – Etapas de hidratação de uma partícula de cimento poliminerálica: C₃S – silicato tricálcico; C₂S – silicato bicálcico; C₃A – aluminato tricálcico; C₄AF – aluminoferrato tetracálcico; C-S-H – silicato de cálcio hidratado; AFt – tri-sulfoaluminato de cálcio hidratado; AFm – mono-sulfoaluminato de cálcio hidratado. Dimensões: partícula de cimento – 1 a 90 μm; C₃S – 25 a 65 μm; C₂S – 20 a 40 μm; C₃A – 1 a 60 μm.

Fonte: Scrivener (2004).



Com o processo da hidratação em andamento, o preenchimento de poros pelos produtos de hidratação tende a reduzir o tamanho desses e os canais microscópicos de intercomunicação entre eles. Isto ajuda a atingir uma maior redução do coeficiente de permeabilidade, consequentemente, melhorando as propriedades mais comuns do concreto.

Segundo Taylor (1992), para uma etapa de hidratação bem executada, o aglomerante deve reagir com a água a uma extensão e taxa suficiente. Em uma relação a/c adequada, a reação deve gerar produtos sólidos de baixa solubilidade e com uma microestrutura que desenvolve resistência mecânica, estabilidade de volume e outras propriedades. A reatividade de uma determinada fase pode não ser a mesma quando considerados todos os constituintes do cimento ou quando considerado cada constituinte potencial isoladamente.

2.1.3 Agregados

Para Silva (2000), é de fundamental importância escolher adequadamente os agregados a serem usados na preparação do concreto, sendo necessário conhecer macroscopicamente sua forma e sua estrutura superficial visando sempre melhorar e aumentar a aderência entre agregado e a pasta.

Silva (2000) diz que os agregados utilizados na preparação dos concretos devem apresentar as seguintes propriedades essenciais:

- a) forma, textura e dimensões adequadas ao emprego ao qual esse agregado será submetido;
- b) boa resistência mecânica;
- c) propriedades térmicas adequadas;
- d) propriedades químicas adequadas aos tipos de aglomerantes empregados e às ações exteriores; e
- e) isenção de substâncias prejudiciais.

A aderência do agregado graúdo com a pasta, a sua textura superficial é parcialmente responsável pela ligação entre matriz pasta e o agregado, por isso, a rocha britada produz aderência superior ao comparado com o pedregulho ou seixo.

Segundo Fagury (2002), no Brasil a pedra granítica britada é o agregado graúdo mais corrente e o seu uso, seguramente, corresponde à bem mais de 50% do consumo total de agregado graúdo para concreto, principalmente nos grandes centros.

Quanto à dimensão máxima característica, segundo Helene (1992), quanto maior, mais econômico será o concreto; esta característica está relacionada à trabalhabilidade do concreto fresco, portanto, depende das fômas, do espaçamento entre as armaduras e dos processos de lançamento e adensamento.

Os agregados naturais comumente utilizados na produção de concreto são geralmente densos e resistentes, portanto, raramente são fatores limitantes da resistência e das propriedades do concreto endurecido. O calcário de baixa

densidade, o mais comum encontrado na natureza, não é recomendável para uso em concretos estruturais, exceto na produção de concreto ciclópico, que é usado geralmente em fundações que apresentam pequenas cargas.

A Tabela 1 mostra as características de alguns tipos de rochas usadas como agregados:

Tabela 1 – Características de alguns tipos de rochas.
Fonte: Uchikawa (1993)

Tipo de rochas	Classe de rochas	Resistência à compressão (MPa)	Resistência da ligação ¹ * (MPa)	Forma do agregado britado
Vulcânicas	Granito	164	2,56	Angular
	Andesita	157		Angular
	Basalto	156		Angular
Sedimentares	Arenito	221	1,99	Angular
	Xisto	91		lamelar
	Tufo	93	2,99	comprimida
	Calcário	145		Angular

¹ Resistência da ligação pasta/agregado de concretos curados com 30 dias de idade (MPa).

Segundo Neville (1997), o calcário, assim como a dolomita, e possivelmente os agregados silicosos, podem apresentar uma aderência química com a pasta cimentícia.

Segundo Silva (2005), a fase representada pelo agregado é a principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e também estabilidade dimensional do concreto. O autor diz que alguns agregados possuem elementos que reagem com alguns compostos do cimento, prejudicando, de certa forma, 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.

Segundo Dalmolin (1995), a distribuição granulométrica do agregado no concreto 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.

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, segundo Aitcin (2000), ao contrário do que ocorre em concretos convencionais, em concretos com relações água/aglomerante baixas e resistências à compressão elevadas, as fases da pasta matriz e da zona de transição se tornam tão resistentes que a fase dos agregados pode-se tornar a mais fraca.

Um ponto importante no que tange à relação agregado gráudo e pasta cimentícia é a sua aderência, existem várias formas de acontecer essa aderência, segundo alguns autores como: Silva (2000) e Farran (1988) elas se dividem em:

- a) ligação mecânica – em escala macroscópica, por rugosidade superficial do agregado em que os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas, muito maiores, da superfície dos materiais aglomerados;
- b) aderência devido à absorção, pelo agregado, da água contendo parte do aglomerante dissolvido, o qual, após penetrar na superfície da partícula, cristaliza-se no mesmo tempo que a pasta, ligando-se a ela;
- c) atração, sem continuidade da estrutura, entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, por força de Van der Waals – ligação puramente física;
- d) continuidade da estrutura cristalina do inerte nos produtos da hidratação do cimento, por crescimento epitáxico com ou sem formação de soluções intermediárias. Uma espécie de ligação, na qual os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongam os do agregado, têm em comum entre si as suas redes cristalinas; e
- e) aderência química entre os produtos de reação da hidratação do cimento e as superfícies do agregado.

2.1.4 Avanços tecnológicos do concreto

Os avanços tecnológicos e aperfeiçoamento das propriedades dos materiais têm provocado uma contínua e crescente discussão sobre os recursos naturais, na medida em que o desenvolvimento demanda uma quantidade razoável de matéria prima e gera um grande volume de resíduos, como acontece com a produção do concreto, assim como na fabricação do Cimento Portland, a cadeia produtiva é carente do desenvolvimento sustentável, pois esses resíduos devem ser minimizados ou reaproveitados na cadeia produtiva. Souza *et al.* (2006) dizem que a ideia de sustentabilidade ainda não está disseminada de forma abrangente, sobretudo na área de Construção Civil, embora esforços venham sendo envidados nos últimos anos para conscientizar todos os envolvidos no processo sobre a problemática que o segmento vem enfrentando com a geração de resíduos e a depredação das jazidas naturais.

Atualmente, tanto a resistência mecânica quanto a durabilidade vêm influenciando na seleção dos materiais na Construção Civil, sobretudo o concreto. A crescente verticalização, com estruturas mais altas, de maiores vãos, tem exigido dos projetistas e pesquisadores a investigação e aprimoramento dos materiais e componentes do próprio concreto.

Silva (2000) explica que o desenvolvimento contínuo é sentido nos metálicos, cerâmicos e plásticos. Nos cerâmicos, como a redução da porosidade diminui a sua fragilidade e aumenta sua resistência, acreditou-se que na aplicação desde princípio ao concreto convencional poderia se obter idênticos benefícios e começou-se, então, uma das primeiras linhas de aperfeiçoamento do concreto: diminuição da porosidade.

No caso do concreto, atualmente, os avanços tecnológicos para alcançar maior durabilidade e melhorias das propriedades estão diretamente associados com o estudo mais profundo de seu comportamento microestrutural como já citado, como também em alternativas de utilização de resíduos industriais, como cinza de casca de arroz, resíduos da construção civil em geral, resíduos de blocos cerâmicos, entre outros.

Destaca-se dentre outros o CAD (concreto de alto desempenho), que é um concreto cujas características e propriedades são superiores as dos concretos convencionais, como trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Esses consistem em uma utilização associada de superplastificantes, partículas de agregados minerais miúdos e aditivos químicos modificadores de viscosidade em uma devida proporção (Mehta e Monteiro, 2008).

2.1.5 Microestrutura do concreto

Silva (2000) explica que as propriedades mais importantes do concreto, tais como: resistência, fissuração por retração, fluência, permeabilidade e durabilidade, são fortemente influenciadas pelas propriedades da pasta de cimento que são governadas pela sua microestrutura.

Quando endurecido, o concreto apresenta três regiões distintas que são: (i) o agregado, (ii) a pasta de cimento e (iii) a zona de transição, explicam Hewlett *et al.* (2004). Denominada de zona ou região de transição, esta área corresponde à interface entre o agregado graúdo (brita) e a pasta de cimento. Sabe-se que essa região, a zona de transição, é pobre em C-S-H gel, composto químico responsável pela boa resistência mecânica do concreto. Esta constatação, já conhecida da literatura, implica no fato de que é nesta região onde se inicia a falha do concreto, ou seja, onde se iniciam os processos de fissuração e propagação de trincas, explicam Mehta e Monteiro (2008).

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 da microestrutura dos concretos são, de acordo com Rigo (1998), apresentados a seguir:

- a) Agregado graúdo: 10 mm a 30 mm;
- b) Agregado miúdo: ± 1 mm;
- c) Cimento: 10 μm a 50 μm ;
- d) Adições minerais bastante finas (sílica ativa) $\pm 0,1$ μm ;
- e) Adições minerais finas (cinzas volantes) 3 μm a 20 μm ;
- f) Grãos de clínquer não hidratados ± 25 μm .

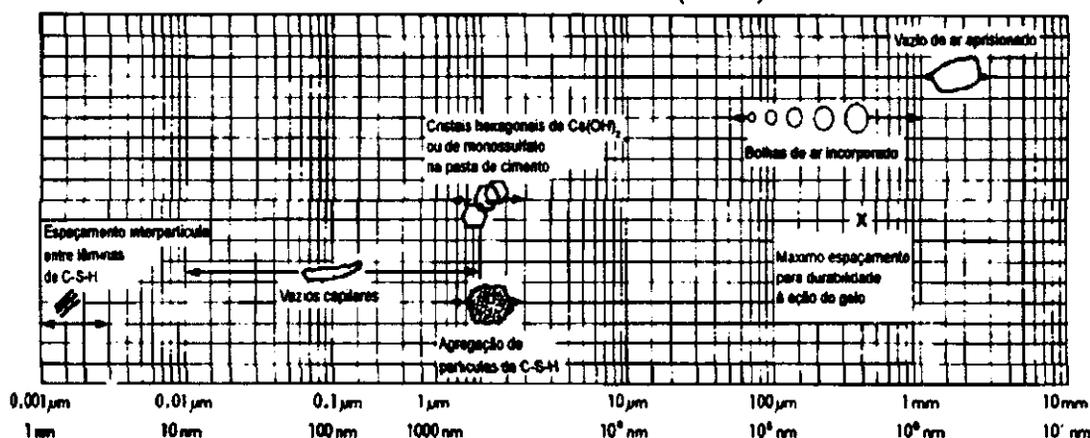
Na sua microestrutura do concreto, encontram-se estruturas de diversas características e origens, na Figura 3, Mehta e Monteiro (2008) identificam estes componentes gerais e suas dimensões.

- espaço interlamelar das estruturas C-S-H, lamelas muito próximas, cujo afastamento fica entre 5 Å e 25 Å ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). São poros muito pequenos, que pouco afetam a resistência mecânica ou a permeabilidade da pasta. O principal efeito desses poros é a retração, quando a água que os preenche, sai;

- vazios capilares: são poros onde o excesso da água de amassamento fica aprisionado. Somente 21% do peso de cimento em água, fica combinada quimicamente na pasta (água estequiométrica). A maior parte da água colocada além deste percentual fica aprisionada nestes poros. Poros capilares com diâmetros superiores a 500 Å favorecem a permeabilidade e prejudicam a resistência mecânica, já poros com diâmetros inferiores a 500 Å influenciam mais a retração e a fluência (MEHTA E MONTEIRO 2008);

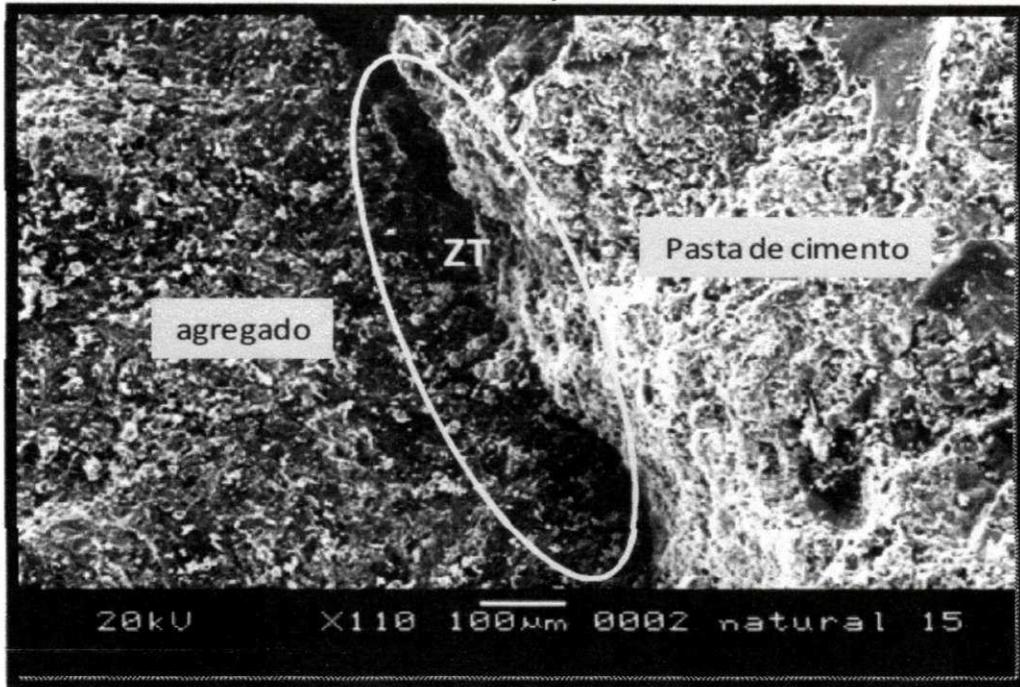
- ar incorporado são pequenas bolhas de ar com diâmetro médio de 5 mm, aprisionadas pelo concreto durante o processo de mistura dos seus componentes. Normalmente, cerca de 1 a 2% do volume total de um concreto é ar. Formam bolhas com diâmetro de 50 µm a 200 µm, que favorecem a trabalhabilidade (NEVILLE, 1997; MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Figura 3 – Dimensões dos componentes existentes na microestrutura do concreto. Fonte: Mehta e Monteiro (2008).



Na Figura 4, a seguir, utilizada na tese de Duart (2008), identificam-se com clareza as fases sólidas encontradas na microestrutura dos concretos: agregado, pasta e zona de transição, em destaque.

Figura 4 – Imagem do concreto, ampliação 110x, com as fases da microestrutura.
Fonte: LMCC – UFSM, 2005 *apud* DUART 2008.



2.1.5.1 Fase matriz

Silva e Librorio (2002) explicam que na microestrutura da pasta de cimento Portland, identificam-se várias fases que não estão uniformemente distribuídas e que não são uniformes em tamanho e morfologia, e que os tipos, quantidades e características dessas fases sólidas são as seguintes:

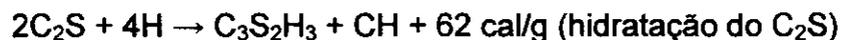
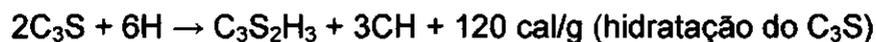
- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): essa fase constitui de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado. Apresenta uma morfologia variando de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino;

· Hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2): também chamada de portlandita, constituem 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada. Há tendência em formar cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos;

· Sulfoaluminatos de cálcio: ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida; e

· Grãos de clínquer não hidratados: dependendo da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratado, mesmo após longo período de hidratação.

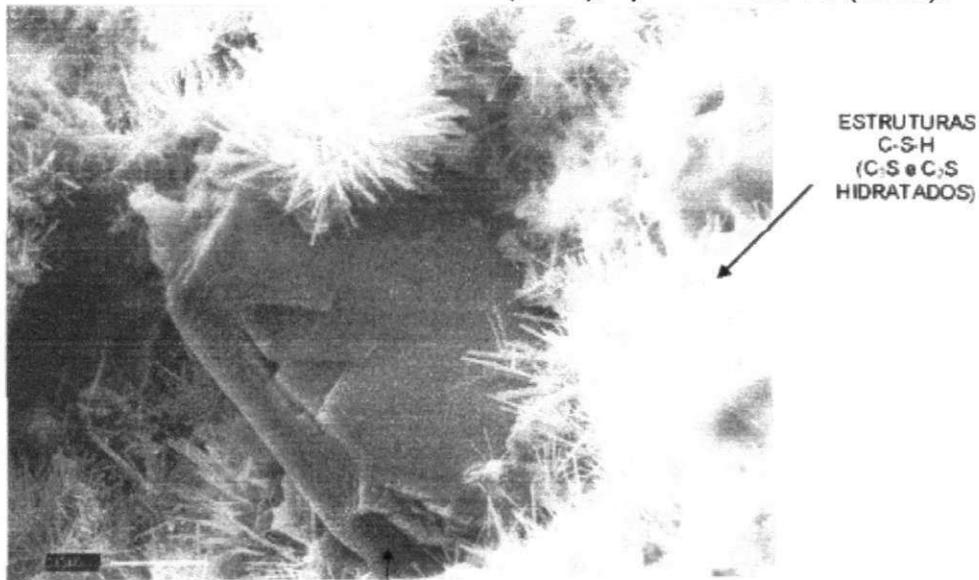
O C-S-H, responsável pela resistência mecânica do concreto, corresponde à estrutura hidratada do C_3S e C_2S , que ocorre da seguinte forma:



Segundo Mehta e Monteiro (2008), 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 fase matriz. 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 nm a 3 nm e os poros capilares em torno de 10 nm a 5000 nm.

Segundo Freitas Jr. (2008), as estruturas de C-S-H são unidas através das forças de van der Waals, possuem resistência mecânica elevada e são quimicamente estáveis. A Figura 5, mostra em imagem gerada pelo MEV, as estruturas de C-S-H encontradas na fase matriz de um concreto.

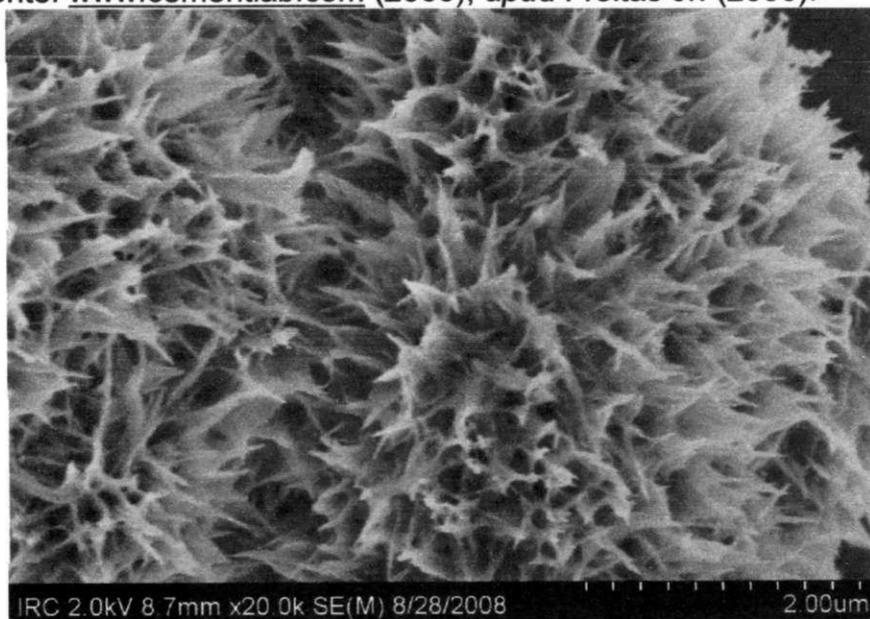
Figura 5 – Imagem dos cristais de C-S-H no concreto.
Fonte: Furnas Centrais Elétricas (2005), *apud* Freitas Jr. (2008).



É importante salientar que a morfologia dos cristais de C-S-H depende das condições de cura impostas no próprio concreto. A Figura 6 mostra imagens dos cristais de C-S-H crescendo depois de duas semanas de idade, em uma relação $a/c = 0,8$.

Figura 6 – Morfologia dos cristais de C-S-H no concreto com 2 semanas de hidratação.

Fonte: www.cementlab.com (2005), *apud* Freitas Jr. (2008).

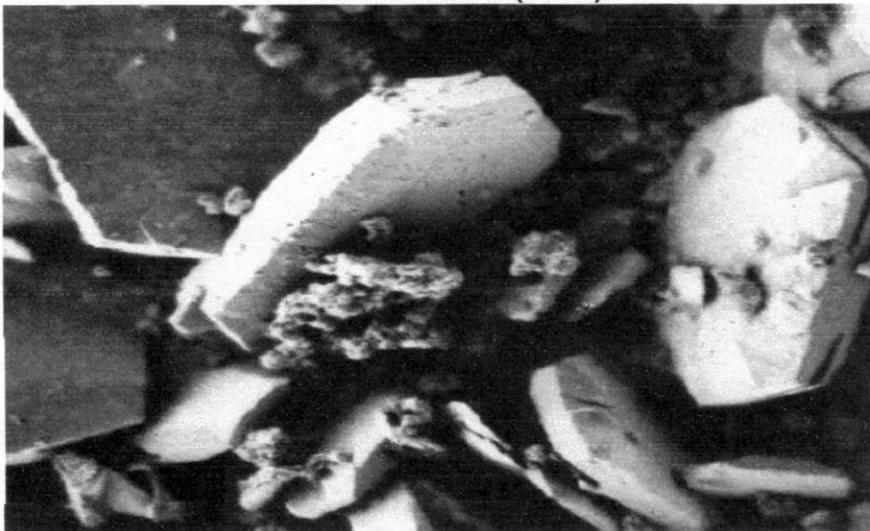


A estrutura prismática encontrada na microestrutura do concreto, o CH, sua morfologia é prismática, são cristais de grande volume, facilmente identificados numa análise de imagens. O CH, segundo Freitas Jr. (2008), ocupa cerca de 20% a 25% do volume da fase matriz.

Já segundo Diamond (1986), a fase hidróxido de cálcio da pasta é composta de diversas morfologias, tais como películas finas e amorfas, chatas ou curvas, placas finas e hexagonais, etc.

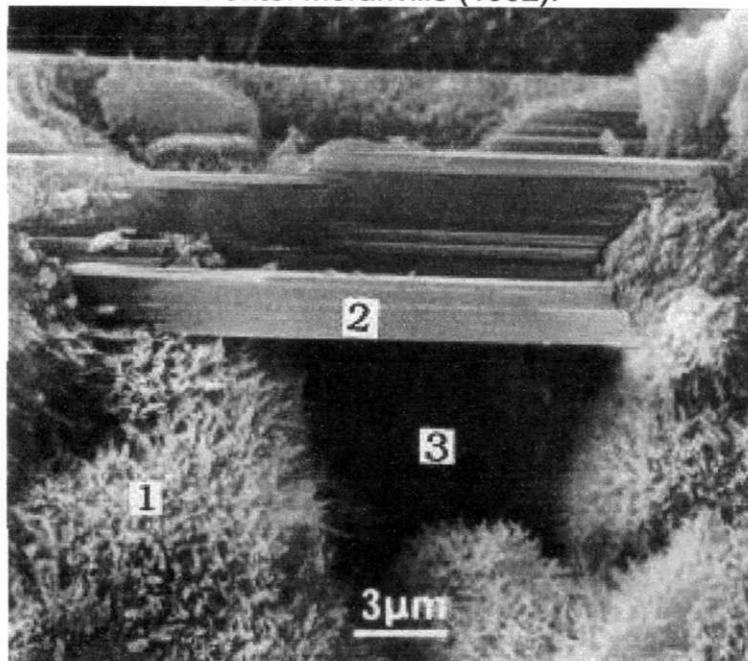
O pH elevado da pasta de cimento, cerca de $\text{pH} = 13$, é consequência da presença desses cristais, porém, ao contrário do C-S-H, o CH é de baixa resistência e é muito reativo quimicamente. A Figura 7 mostra a morfologia dos cristais CH, em forma de estruturas hexagonais.

Figura 7 – Morfologia dos cristais de CH no concreto.
Fonte: Freitas Jr. (2008).



A Figura 8 mostra diversos cristais existentes na microestrutura do concreto, nela é fácil visualizar as diferentes morfologias e volumes.

Figura 8 - Imagens dos cristais: 1 = C-S-H; 2 = CH; 3 = vazio capilar.
Fonte: Moranville (1992).



2.1.5.2 Fase zona de transição

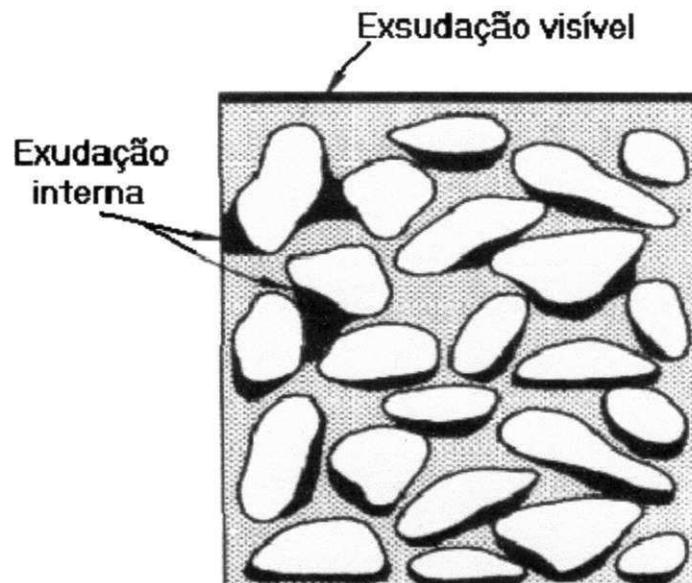
Os primeiros estudos realizados à zona de transição, região entre a pasta e o agregado foram realizados por Farran (1956), o mesmo observou características distintas nesta região em vista da diferente microestrutura apresentada em relação à matriz (GENGIYNG, 2001).

Mehta e Monteiro (2008) explicam que na microestrutura do concreto distingue-se que a pasta de cimento em contato com a face do agregado gráudo possui características diferentes do restante da pasta, isso identificado em uma espessura de 10 μm a 50 μm , sendo considerada mais uma componente do concreto, conhecida como zona de transição.

As razões mais importantes da origem das características da zona de transição são a exsudação interna e a concentração de cristais de etringita e de hidróxido de cálcio. A exsudação interna é causada pela migração no sentido vertical do excesso da água de amassamento, formando uma fina película de água sob a superfície inferior dos grãos dos agregados devido ao efeito-parede, principalmente nos gráudos, ver a Figura 09, aumentando a relação

água/aglomerante e reduzindo a resistência mecânica desta região (Mehta e Monteiro, 2008).

Figura 9 – Ilustração da exsudação interna e externa.
Fonte: Mehta e Monteiro (2008).



De maneira geral, Silva (2000) cita as principais características da zona de transição que difere das outras fases da microestrutura do concreto:

- a) maior quantidade de cristais de hidróxido de cálcio e de etringita, sendo esses materiais mais bem formados e de maior tamanho;
- b) os cristais de hidróxido de cálcio estão orientados, preferencialmente, de modo que seus planos de clivagem estejam, aproximadamente, perpendiculares à superfície do agregado; e
- c) a porosidade da interface é maior do que a da matriz.

Esta fase, a zona de transição, é caracterizada por ser uma região de maior porosidade em relação ao restante da pasta de cimento e sua espessura varia conforme os componentes da pasta e do agregado, segundo Kaefer (2002).

A zona de transição do concreto, que faz parte da sua microestrutura, segundo Castro (2007), é a região localizada pela interface entre a superfície do agregado e a pasta de cimento. O autor explica que essa região trata-se de um ponto de maior fragilidade da matriz, e nela ocorre a formação do efeito parede,

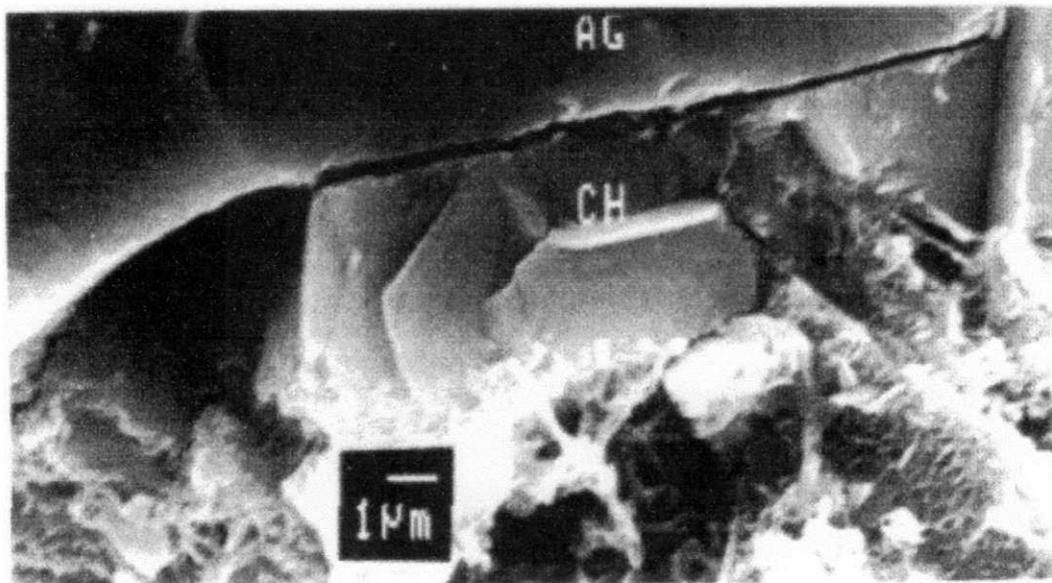
que reflete nas propriedades como a resistência mecânica e a durabilidade do concreto, ou seja, o seu ponto fraco. Quando o concreto é submetido a uma tensão, a região crítica de rompimento é a zona de transição, por ser a região mais frágil, esse fenômeno é explicado pela formação heterogênea e carente de C-S-H.

Silva (2000) explica que a resistência da pasta de cimento depende principalmente das forças de atração de van der Waals, ou seja, a resistência será maior, quanto mais compacta seja a pasta e quanto menos cristalinos sejam os produtos de hidratação, ou seja, que tenha uma alta área superficial, uma alta massa molecular e um comprimento de cadeia maior – maior quantidade de C-S-H.

Pode-se entender, então, o porquê os autores considerarem a zona de transição como a região mais frágil do concreto, menos resistente.

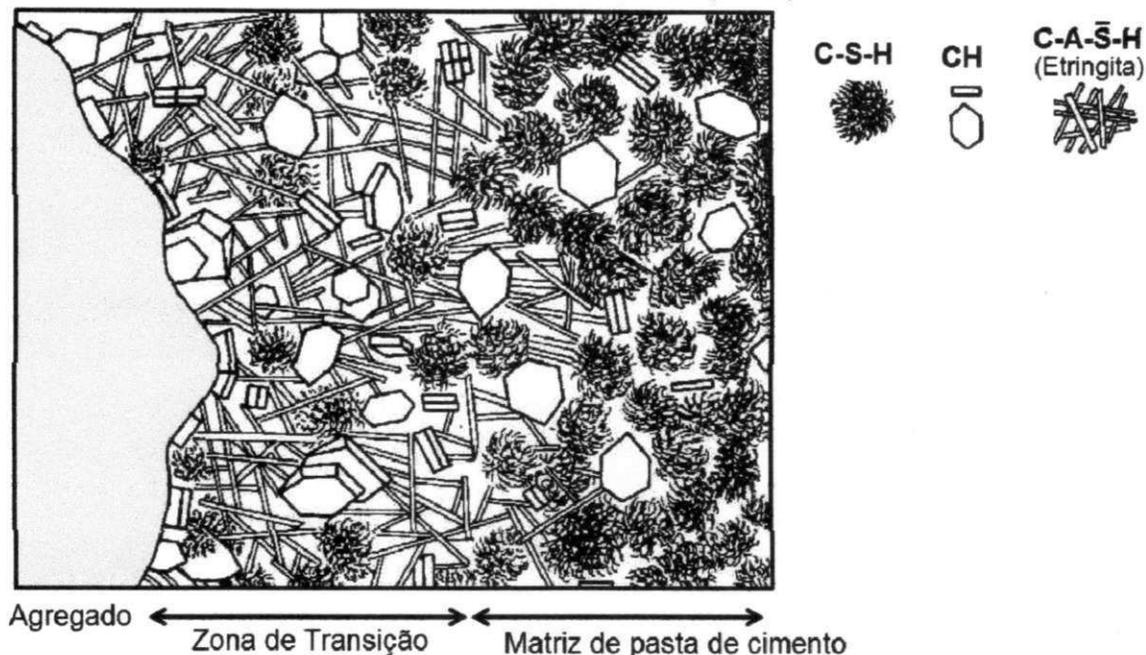
A figura 10, apresenta uma microscopia da zona de transição em um concreto convencional, a fase agregado (AG) está bem distinta dos cristais de hidróxido de cálcio (CH). É justamente nesta região que se dá a ruptura do concreto.

Figura 10 – Ruptura do concreto na zona de transição, escala em 1 μm .
Fonte: Aïtcin (2000).



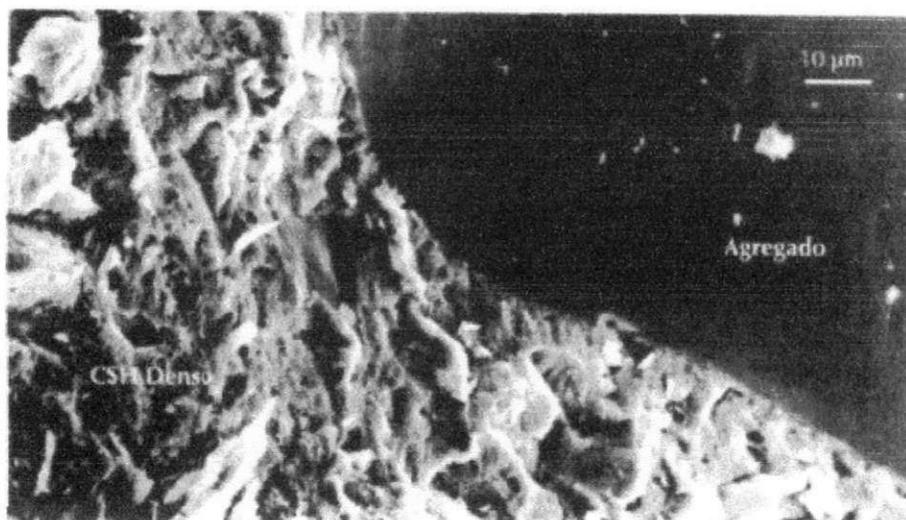
A variação da concentração do composto C-S-H é um ponto interessante nos estudos que abordam a interação química do agregado com a pasta na zona de transição, na qual, em geral, sua concentração é reduzida, conforme Figura 11.

Figura 11 – Representação esquemática da zona de transição do concreto.
Fonte: Mehta e Monteiro (2008).



Estudos realizados por Vivenkanadam e Patnaykuny (1997), mostram que a espessura da zona de transição entre agregado e a pasta, em concretos de elevado desempenho foi verificado em torno de 15 μm , enquanto que em concretos convencionais pode chegar até 50 μm . Essa característica é comprovada através da Figura 12, onde se percebe a presença de C-S-H denso em contato com o agregado, a ausência de uma zona intermediária.

Figura 12 – Interface da pasta/agregado de um concreto de elevado desempenho, escala em 10 μm .
Fonte: Aitcin (2000).



É bom ressaltar que a zona de transição não é peculiar apenas em superfícies dos agregados, mas também está presente em outras interfaces em compósitos à base de materiais cimentícios, tais como a região da interface aço-cimento e argamassa-substrato.

2.2 ROCHA CALCÁRIA

Conforme Sampaio e Almeida (2008), certamente não existem outros tipos de rochas com uma variedade de usos tão ampla quanto o calcário. Esta rocha é usada na obtenção de blocos para a indústria da construção, material para agregados, cimento, cal e até rochas ornamentais. As rochas carbonatadas e seus produtos são também usados como: fluxantes; fundentes; matéria prima para as indústrias de vidro; refratários; cargas; agentes para remover enxofre, fósforo e outros; na indústria siderúrgica; abrasivos; corretivos de solos; ingredientes em processos químicos; dentre outros.

Algumas variações da utilização do carbonato de cálcio são colocadas pelos autores Sampaio e Almeida (2008), tais como:

- a) materiais da construção civil à produção de alimentos;
- b) purificação do ar ao tratamento de esgotos;

- c) refino do açúcar à pasta de dentes; e
- d) na fabricação de vidros e aço à fabricação de papéis, plásticos, tintas, cerâmicas e tantos outros.

O carbonato de cálcio na forma de calcita (CaCO_3) é o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore com elevada pureza. O calcário encontrado extensivamente em todos os continentes é extraído de pedreiras ou depósitos que variam em idade, desde o Pré-Cambriano até o Holoceno. As reservas de rochas carbonatadas são grandes, entretanto, a sua ocorrência com elevada pureza correspondem a menos que 10% das reservas de carbonatos lavradas em todo o mundo, segundo Sampaio e Almeida (2008).

Segundo Schnellrath *et al.* (2001), a aragonita (CaCO_3) possui a mesma composição química da calcita, entretanto difere na estrutura cristalina, seu aproveitamento econômico acontece apenas para os depósitos de conchas calcárias e oolitas. Trata-se de um mineral metaestável, cuja alteração resulta na calcita, forma mais estável. Outros minerais estão associados a rocha calcária, porém em menos quantidade. A Tabela 02 mostra as propriedades físicas dos minerais carbonatados mais comuns:

Tabela 02 – Propriedades físicas dos minerais carbonatados.
 Fonte: Sampaio e Almeida (2008).

Calcita (CaCO_3) CaO 56%	Componente mais comum nos calcários e mármore, bem como de outras rochas sedimentares e metamórficas. Ocorre no sistema cristalino e hexagonal com boa clivagem romboédrica. Dureza: 3 (escala Mohs). Densidade: 2,72. Comumente ocorre na cor branca ou sem cor (hialino) e colorida, quando contém impurezas.
Dolomita $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ CaO 30,4% MgO 21,95%	Sua origem pode ter sido secundária, por meio da substituição do cálcio pelo magnésio. Sistema cristalino hexagonal, comumente em cristais romboédricos com faces curvadas. Dureza: 3,5 a 4,0. Densidade: 2,87. Comumente ocorre nas cores branca e rósea.
Aragonita (CaCO_3) CaO 56%	É menos estável que a calcita e muito menos comum. Forma-se a baixas temperaturas e ocorre em depósitos aflorantes ou próximos à superfície, especialmente nos calcários, em rochas sedimentares e metamórficas. Sistema cristalino ortorrômbico. Dureza: 3,5 a 4,0. Densidade: 2,93 a 2,95. Comumente ocorre na forma hialina.
Siderita (FeCO_3)	Cristais romboédricos nas cores castanha ou preta. São mais comuns. Dureza: 3,5 a 4,0. Densidade: 3,7 a 3,9.
Ankerita $(\text{Ca}_2\text{MgFe}(\text{CO}_3)_4)$	Ocorre no sistema hexagonal, comumente com cristais romboédricos. Dureza: 3,5 a 4,5. Densidade: 2,96 a 3,1. Cores mais comuns: branca, rósea ou cinza.
Magnesita (MgCO_3)	Sistema hexagonal. Usualmente ocorre na forma granular ou massa terrosa. As cores mais comuns variam desde o branco ao amarelo; podem apresentar-se em outras cores quando ocorrem impurezas.

Uma parte significativa do calcário, senão a maior, existente é de origem orgânica. O cálcio disponível em solução, seguindo a precipitação química, é utilizado por uma variedade de vidas marinhas, tais como: corais, foraminíferos, moluscos e equinodermos, para formar conchas de calcário que se acumulam no fundo mar.

Sampaio e Almeida (2008) dizem que as estruturas de calcário de origem marinha são praticamente de carbonato de cálcio puro e são frequentemente encontradas intactas em calcários como greda e marga. Os sedimentos de calcário derivados desse processo podem contaminar-se durante a deposição com materiais argilosos, silicosos ou siltes ferruginosos, que afetam a composição química e a natureza do calcário resultante. O tamanho e a forma das partículas de calcário, decorrentes das condições de pressão, temperatura e ação de solvente, são fatores que influenciam as características físicas da rocha.

2.2.1 Calcário de alta densidade (Cariri Cearense)

Segundo Vidal e Padilha (2003), a Bacia do Araripe tem extensão regional, englobando os estados do Ceará, Piauí e Pernambuco, com uma área total de 9.000 km², disposta no sentido Leste-Oeste por cerca de 180 km e Norte-Sul por cerca de 70 km, no seu trecho mais largo.

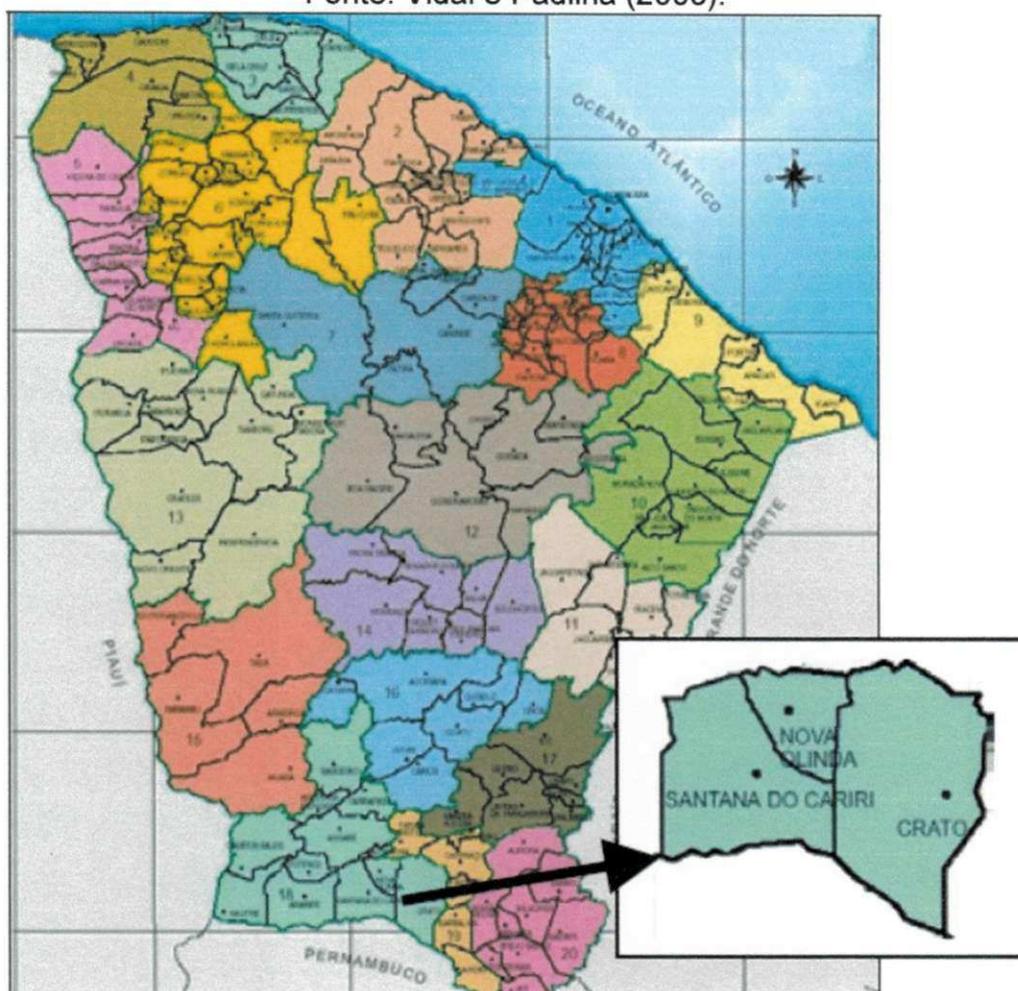
Os autores Vidal e Padilha (2003) explicam ainda que os calcários laminados da Formação Santana, por sua abundância, constituem-se em uma das mais importantes representações do Cretáceo cearense. Esta formação de origem marinha/lacustre apresenta uma sequência sedimentar estratificada, quase horizontal, com siltitos argilosos, margas com concreções calcárias e bancos calcários, gipsita, calcários laminados, siltitos e folhelhos betuminosos com cerca de 250 m de espessura depositada em extensa área, formada no Mesozóico, mais precisamente no período Cretáceo, iniciado há cerca de 135 milhões de anos, prolongando-se por 65 milhões de anos. São 3 (três) as fases de desenvolvimento da Formação Santana, a saber:

- a) a primeira apresenta camadas calcárias argilosas e silticas, finamente estratificadas e laminadas, que representam um depósito lacustre de água doce;
- b) a segunda é constituída por camadas de gipsita e de calcários fossilíferos sob condições salinares, devido a ingressão marinha, procedente do oeste e a forte evaporação, reinando na época um clima árido; e
- c) a terceira é composta de camadas argilosas e silticas, depositadas sob condições de clima úmido, com dulcificação rápida da Bacia até a fase lacustre final.

Especificamente a região do Cariri, local onde foram coletadas as amostras de calcário de alta densidade, a Figura 13 mostra um mapa ilustrativo dos municípios de Santana do Cariri, Nova Olinda e Crato, todos eles pertencentes ao estado do Ceará.

Figura 13 – Imagem ilustrativa do mapa do Ceará, focando a região do Cariri cearense.

Fonte: Vidal e Padilha (2003).



O calcário laminado situado na secção inferior da Formação Santana, Membro Crato, constitui uma formação que, de acordo com Ponte e Appi (1990), apresenta uma espessura média da ordem de 50 metros e compreende da base para o topo, folhelhos cinzas, castanhos, calcíferos, laminados e calcários micríticos cinza claro a creme, argilosos e finamente laminados.

Segundo Viana (1999 *apud* Melo, 2008) na região de Nova Olinda e Santana do Cariri, os calcários laminados apresentam menores espessuras (cerca de 10 m), onde os níveis de calcilutitos mostram-se mais fossilíferos, sendo ricos em vegetais (gimnospermas e angiospermas), artrópodes (insetos e aracnídeos) e peixes (actinoptérígios).

Segundo Melo (2008), nessa região observa-se o contato discordante com folhelhos marrom-avermelhados da Formação Missão Velha. A estratificação

regular, muito fina e paralela indica um ambiente calmo de sedimentação. A associação fossilífera de conchostráceos, ortracodes, insetos e peixes relativamente pequenos (Dastilbe) documentam um depósito em um corpo de água doce. A região de Nova Olinda representa, provavelmente, as bordas de uma grande lagoa, que recebeu contribuição terrestre de plantas e aérea de insetos, que por ventura fossem carreados ou caíssem na água. O contato superior com o Membro Ipubi é discordante.

Segundo Vidal e Padilha (2003), os calcários laminados, Pedra Cariri, alvo deste trabalho, afloram de modo tabular ao longo de rios e riachos, onde processos erosivos revelam com maior intensidade essas rochas que exibem uma coloração predominantemente creme claro a amarelo intenso, por vezes cinza claro; sua laminação é bastante acentuada, exibindo estratificação planoparalelas horizontalizadas. Um Perfil Geológico Esquemático da jazida pode ser visualizado na Figura 14. Segundo dados oficiais do DNPM/2004, as reservas do calcário laminado nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri da ordem 114,5 milhões de metros cúbicos, o que equivale a 275 milhões de toneladas.

Figura 14 – Perfil geológico esquemático de jazida de calcário
 Fonte: Oliveira (1998).



Segundo Ribeiro *et al.* (2006), a região do Cariri cearense se apresenta como um importante pólo mineral, em virtude da sua rica reserva em jazidas de calcário sedimentar laminado e cristalino, abrangendo principalmente os municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda (calcário laminado) e Altaneira e Farias Brito (calcário cristalino). O calcário cristalino é extraído e processado em fornos tipo caieiras e, em sua grande maioria, é utilizado na indústria de cal.

O calcário encontrado na cidade de Farias Brito, conhecido como calcário cristalino, é denominado na região de calcário cinza, sendo esse, de densidade e resistência maiores que do calcário convencional.

Segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, a região onde são encontradas as jazidas de calcário de alta resistência possui cerca de 97 milhões de metros cúbicos, equivalentes a 241 milhões de toneladas, englobando 13 municípios, sendo Nova Olinda e Santana do Cariri os mais importantes.

Segundo Ribeiro *et al.* (2006) a rocha calcária dessa região do Cariri cearense apresenta uma elevada resistência mecânica, cerca de 120 MPa, especialmente pela sua formação cristalina, que lhe confere elevada dureza.

A pesquisa de Ribeiro *et al.* (2006) utilizou o calcário de alta densidade como um novo insumo mineral na composição de massa asfáltica, resultando, assim, bons resultados físicos de sua utilização na pavimentação.

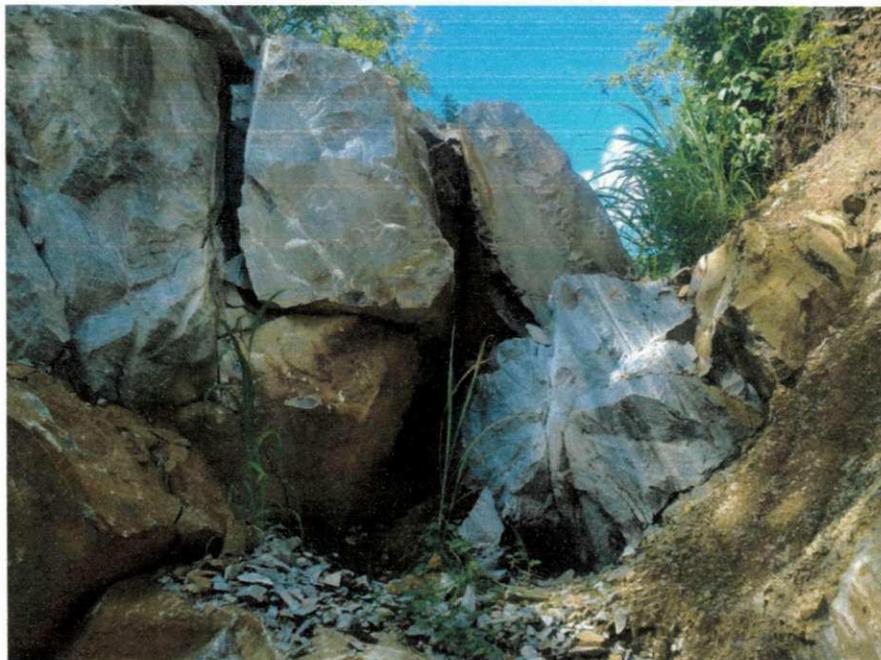
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Um dos materiais utilizados nesta pesquisa foi a rocha calcária proveniente do estado do Ceará conforme mostra a Figura 15, onde existe uma formação típica de calcário de alta resistência mecânica, segundo Ribeiro *et al* (2006).

Já foram realizados alguns ensaios com este material no passado, mas sem a investigação por microscopia eletrônica da zona de transição em concretos preparados com este agregado.

Figura 15 – Jazida de calcário de alta densidade, Farias Brito - CE.



Na coleta das amostras foram encontradas duas formações distintas do calcário de alta densidade, sendo a primeira de coloração clara, sendo chamado na região como “pedra branca”, o outro tipo de formação rochosa de calcário com coloração cinza, chamado de “pedra cinza”. Para critério de detalhamento de sua composição e influência na zona de transição dos concretos preparados com esses dois tipos de rocha calcária de alta densidade, esta pesquisa fez a coleta dos dois tipos encontrados na região e utilizou-os de forma independente para

análise. Seguem as Figuras 16 e 17, mostrando seus aspectos distintos, fáceis de serem identificados *in loco*, dos agregados utilizados na pesquisa.

O calcário convencional, de baixa densidade, foi utilizado na pesquisa para comparação dos resultados obtidos nas análises realizadas, esse calcário é oriundo das jazidas locais da cidade de João Pessoa.

Figura 16 – CADB (calcário de alta densidade branco); CADC (calcário de alta densidade cinza).

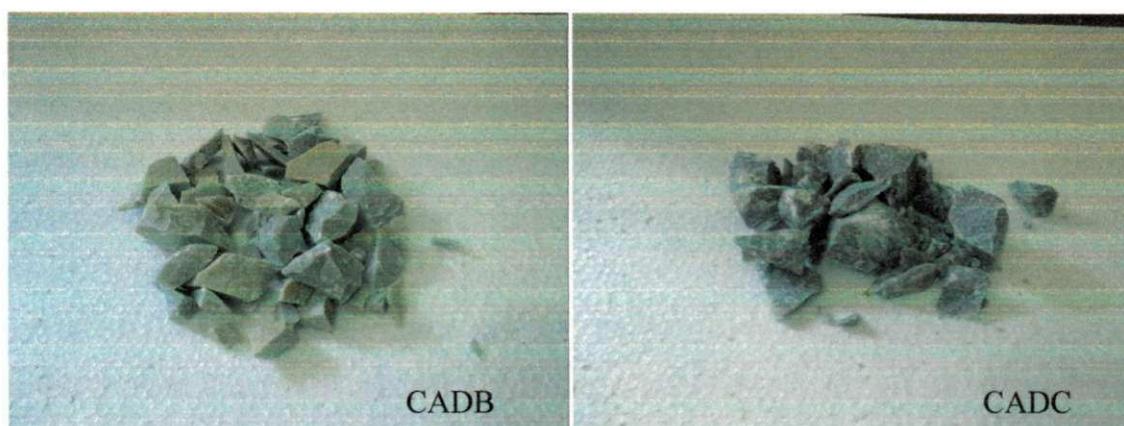
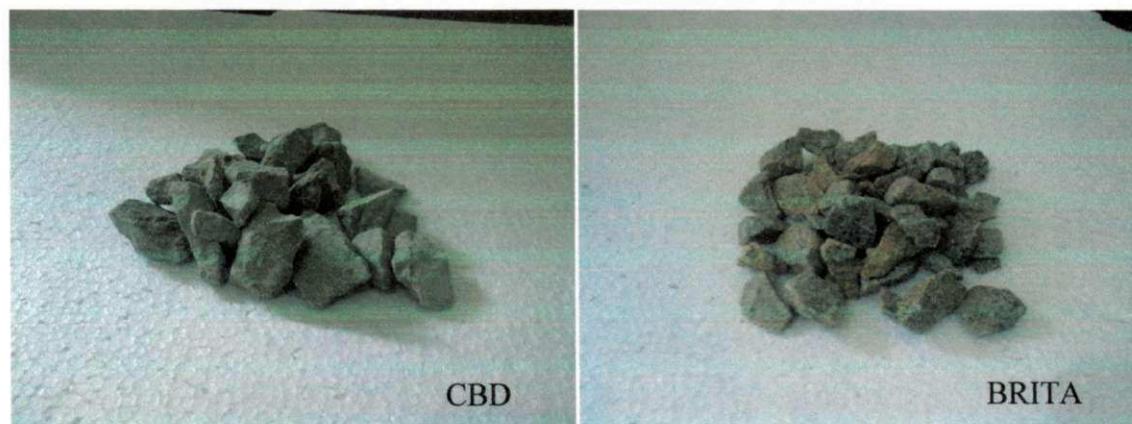


Figura 17 – CBD (calcário de baixa densidade); BRITA (brita granítica).

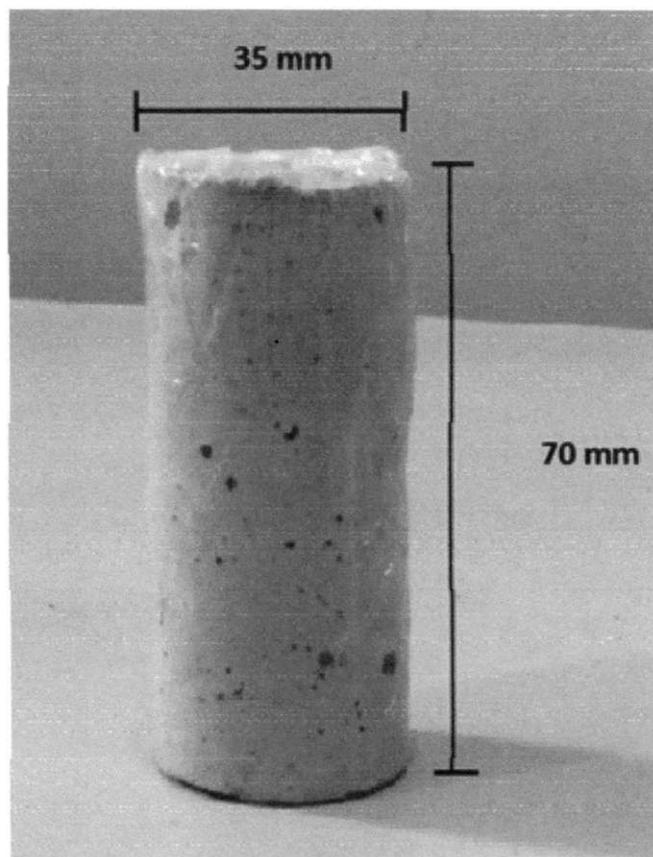


Na preparação dos concretos, foram utilizados o cimento Portland CII Z – 32 MPa, a areia natural quartzosa, brita granítica com dimensão máxima característica de 9,5 mm e os agregados não convencionais em estudo: CADB, CABD, CBD (calcário de baixa densidade).

Foram produzidos seis corpos de prova para cada tipo de concreto: sendo eles preparados com os quatro tipos de agregado graúdo para cada um e com fatores água/cimento iguais a 0,5, para análise do comportamento da zona de

transição com os diferentes agregados. Os corpos de prova sugeridos por Rossignolo (2003) foram de 35 mm de diâmetro e 70 mm de altura, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Corpo de prova utilizado na pesquisa.



Para cada corpo de prova, foram utilizadas as seguintes quantidades de materiais, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Materiais utilizados nos corpos de prova.

Materiais	Massa
Cimento	30,70 g
AM ¹	61,41 g
AG ²	61,41 g
Água	15 ml

¹ Agregado miúdo ² Agregado graúdo

3.2 MÉTODOS

Todos os concretos foram preparados com o mesmo traço 1:2:2:0,5 para melhor análise comparativa.

Na primeira etapa, foram realizados ensaios de caracterização física, química e mineralógica das matérias primas tais como: fluorescência de raios X, massa específica, difração de raios X e pH.

A preparação das amostras de concreto seguiu também a metodologia sugerida por Rossignolo (2003) com adaptações. Em sua tese este autor realizou pesquisas na zona de transição de concretos preparados com argila expandida, cuja metodologia será empregada nesta pesquisa. Esta é usada como procedimento padrão no Núcleo de Química (NQ) do Departamento de Materiais de Construção (DMC) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa, Portugal, local onde foram realizados os ensaios de caracterização das amostras de Rossignolo.

3.2.1 Preparação para DRX, FRX, pH e massa específica

As amostras brutas dos agregados utilizados na pesquisa foram lavadas em água corrente com auxílio de escova com cerdas grandes para limpeza do material bruto contaminante, em seguida, uma limpeza mais cuidadosa foi feita com uma escova de cerdas pequenas e macias. As amostras passaram 5 dias em estufa ventilada, a 35°C.

Após secagem das amostras, elas foram submetidas ao tritramento manual com uso de martelo de aço inox, sob chapa do mesmo material, para evitar possíveis contaminantes, em seguida, o material triturado foi para o Moinho “periquita”, modelo CT 242, com bolas de alumina. Foi utilizado uma proporção de 1:4, a relação de massa de amostra / massa de bolas, cerca de 60 g de amostra com 240 g de bolas de alumina.

O CADB, CADC e a brita foram submetidos à moagem por 45 minutos, o CBD foi submetido a 35 minutos de moagem, devido a ser menos denso e duro. Os pós gerados pela moagem dos agregados (amostras) passaram pelo

peneiramento mecânico, todas as amostras ficaram em tigelas de cerâmica de alta resistência com as bolas de alumina, em um volume de 500 ml.

O pó, resultante do peneiramento, que passou pela peneira ABNT nº 200 (0,074 mm) foi armazenado para realizar os ensaios de FRX, DRX e pH, todos realizados no Laboratório de Caracterização Engenharia de Materiais da UFCG.

Para o ensaio de Difração de Raios X, utilizou-se o Difratorômetro de Raios X, modelo SHIMADZU 6000, Figura 19.

Figura 19 – Difratorômetro de raios x. Modelo SHIMADZU 6000.



Para realização do ensaio de pH (Potencial Hidrogeniônico), foram seguidos os procedimentos adotados pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) para determinação do pH de rochas e solos, para isso, foi utilizado o pó resultante da moagem e peneiramento, descrita anteriormente, das amostras misturado à água destilada e as medições foram realizadas com peagâmetro em um período de 48 horas de intervalo em cada medição, num total

de 45 dias para que a solução pudesse se estabilizar, o procedimento foi realizado no laboratório de ensaios químicos do IFPB, nas seguintes quantidades:

- a) 10 cm³ de amostra em pó; e
- b) 10 ml de água destilada.

Para o ensaio de massa específica e absorção dos agregados, foi adotada a NM 53/2009 que trata dos ensaios de determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados graúdos.

3.2.2 Preparação para MEV

Foram moldados três corpos de prova de 35 mm de diâmetro e 70 mm de altura para cada tipo de concreto, diferenciando o agregado, todos com o seguinte traço 1:2:2:0,5. Após a moldagem, os corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida (23°C ± 2°C e 95% ± 5% UR) e desmoldados após 24 horas. Em seguida, os corpos de prova permaneceram na câmara úmida por mais 27 dias. Após o período de cura úmida, os corpos de prova foram envolvidos em um filme plástico e armazenados em uma sala climatizada (25°C ± 3°C e 60% ± 15% UR), até a realização das análises experimentais.

Na escolha e na análise das amostras de concreto, para o estudo da interface entre o agregado e a pasta de cimento, foram tomados os seguintes cuidados: foram utilizadas as amostras do centro do corpo-de-prova, por sugestão de Rossignolo (2003); fez-se o corte das amostras em planos perpendiculares ao sentido de moldagem; e foram analisadas as interfaces ao redor dos agregados que apresentaram dimensão máxima (9,5 mm) na superfície analisada. Na preparação para análise no MEV (modo elétrons secundários), as amostras de concreto foram cortadas em dimensões de 3,0 cm x 3,0 cm, com 1,0 cm de espessura, conforme Figura 20, utilizando serra de baixa rotação, com disco diamantado, modelo Strueers – Minitom a 100 rpm.

Após o corte, as amostras foram imersas em álcool isopropílico durante 24 horas para interrupção da hidratação da matriz de cimento. Em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de secagem, permanecendo 12 horas

em estufa ventilada, com temperatura de 35°C e 24 horas em dissecador à temperatura de 23°C ± 2°C.

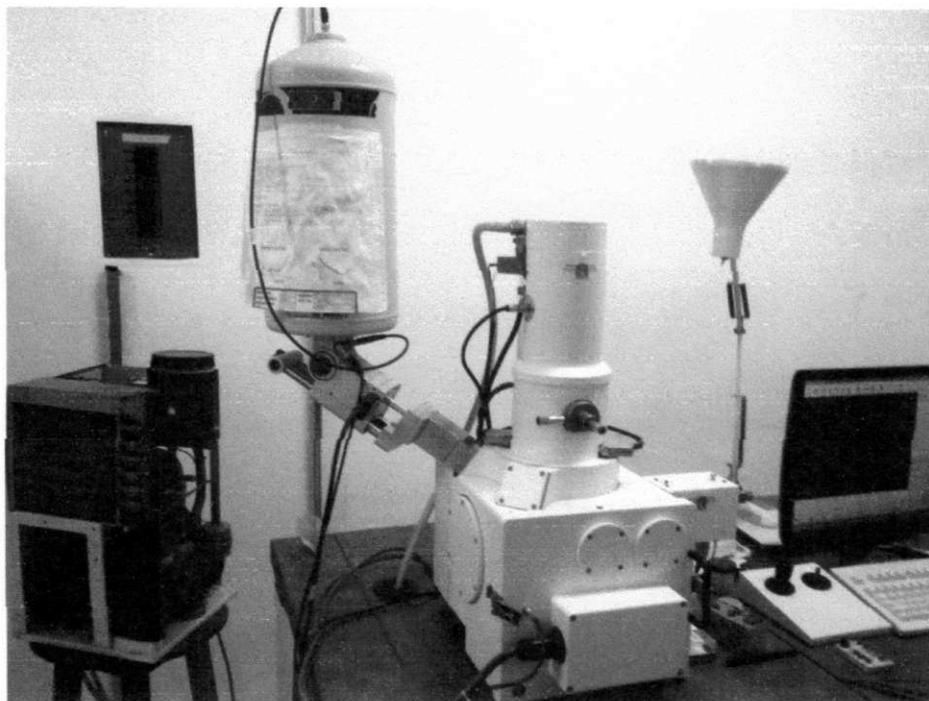
Figura 20 – Amostra do concreto cortada em dimensões 1,0 cm x 1,0 cm, com 0,5 cm de espessura.



As amostras passaram pelo processo de polimento, utilizaram-se lixas de carbeto de silício 300, 400, 600 e 1000, as amostras depois de limpas, utilizando sempre ultra-som com resfriamento com álcool isopropílico, em seguida, as amostras passaram por mais um processo de polimento, especificamente com pasta de diamante com grãos de 1,00 μm . Após mais um procedimento de limpeza com ultra-som e álcool isopropílico, as amostras receberam uma camada condutora de ouro, que segundo Ferreira Jr (2005), este procedimento conhecido como metalização de amostras, este ocorre quando trata-se de um material não condutor de elétrons, como polímeros, cerâmicas, pastas, argamassas e concreto, torna-se necessário também para evitar um efeito chamado de carregamento, que impede a obtenção de imagens satisfatórias para análise durante (ANDRADE E VEIGA, 1998).

O ensaio do MEV foi realizado no LSR (Laboratório de Solidificação Rápida) da UFPB, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura a vácuo, conforme Figura 21.

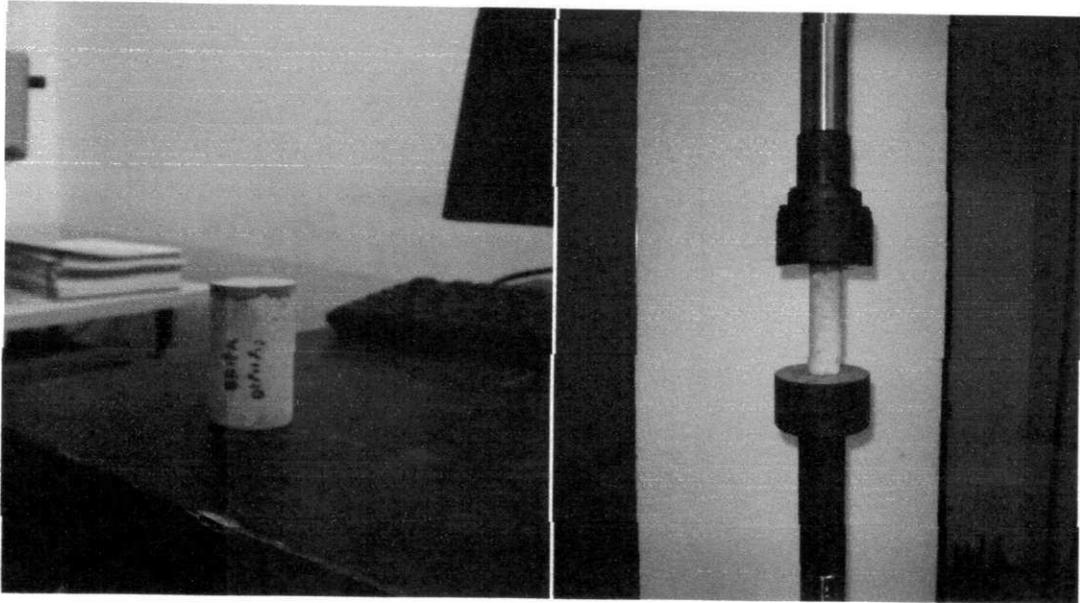
Figura 21 – Microscópio Eletrônico de Varredura.



3.2.3 Preparação para ensaio de resistência mecânica

Foram preparados 6 corpos de prova com 35 mm de diâmetro e 70 mm de altura para cada tipo de concreto preparado, após secagem e cura por 28 dias, os corpos de prova passaram 7 dias em estufa ventilada a 35°C, e foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, os ensaios foram realizados no LABEME/UFPB, com auxílio de uma máquina de ensaio de compressão, modelo SHIMADZU 50000, com limite de 50 Kgf, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Corpo de prova utilizado para ensaio de resistência mecânica.

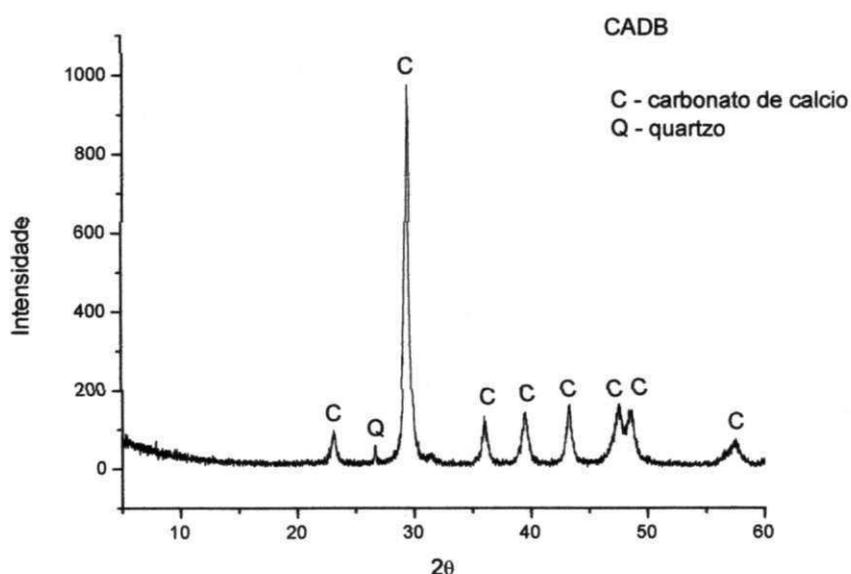


4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DRX DOS AGREGADOS

O calcário de alta densidade estudado, originado do cariri cearense, foi dividido em dois grupos, o CADB (calcário de alta densidade branco) e o CADC (calcário de alta densidade cinza), esses foram estudados separadamente por apresentarem características distintas de coloração, embora, sejam oriundos da mesma jazida, a Figura 23, apresenta o difratograma das fases cristalinas dos componentes do calcário de alta densidade branco.

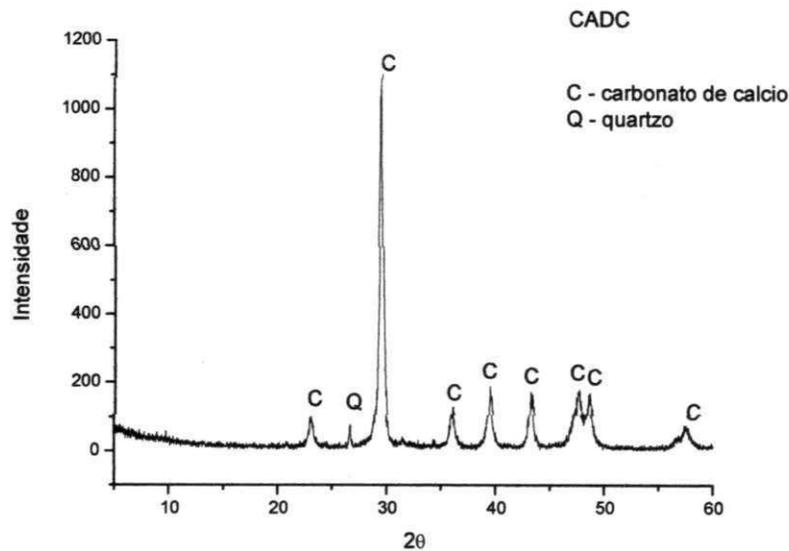
Figura 23 – DRX do calcário de alta densidade branco.



Analisando o difratograma da Figura 23, verifica-se que o calcário de alta densidade branco é formado pelas seguintes fases mineralógicas: carbonato de cálcio com distância interplanar basal de 3,03 Å e quartzo com distância interplanar basal de 3,34 Å.

A Figura 24 apresenta o difratograma do calcário de alta densidade cinza.

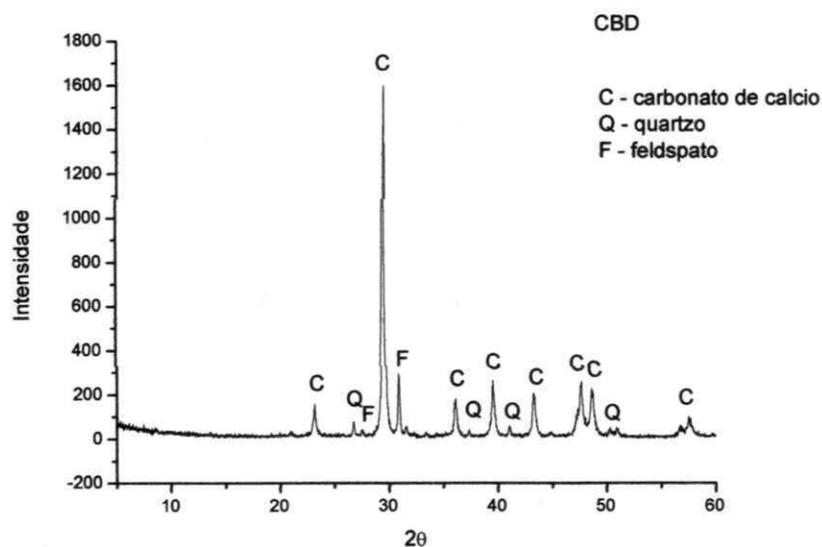
Figura 24 – DRX do calcário de alta densidade cinza.



Analisando a curva de DRX da Figura 24, verifica-se que o CADC é formado pelas seguintes fases mineralógicas: carbonato de cálcio com distância interplanar basal de 3,03 Å e quartzo com distância interplanar basal de 3,34 Å.

A Figura 25 apresenta o difratograma do calcário de baixa densidade, este é o calcário convencional que foi usado na pesquisa como referência nos ensaios de caracterização, resistência mecânica e comportamento da zona de transição.

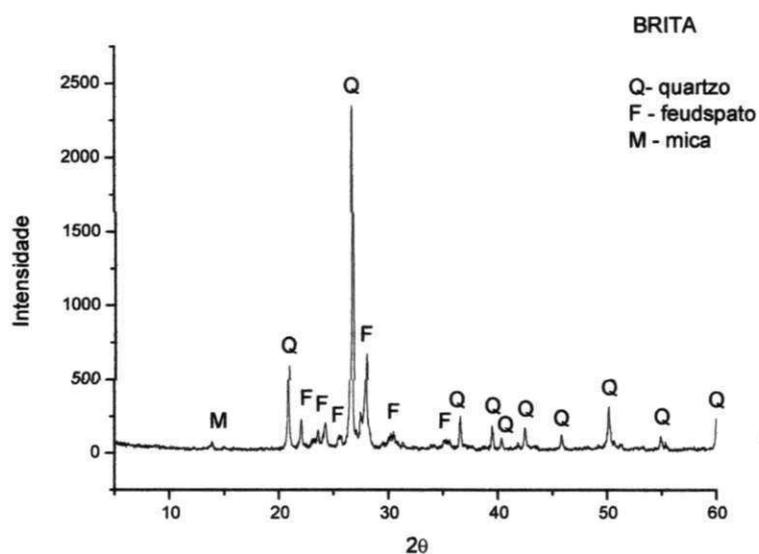
Figura 25 – DRX do calcário de baixa densidade.



Analisando a curva de DRX da Figura 25, verifica-se que o CBD é formado pelas seguintes fases mineralógicas: carbonato de cálcio com distância interplanar basal de 3,03 Å, quartzo com distância interplanar basal de 3,34 Å e feldspato com distância interplanar basal de 1,90 Å.

A Figura 26 mostra o DRX do agregado comumente usado em nossa região, a brita granítica, usado na pesquisa também como referencial dos parâmetros de caracterização e comportamento físico.

Figura 26 – DRX da brita granítica.



Analisando a curva de DRX da Figura 26, verifica-se que a brita é formada pelas seguintes fases mineralógicas: quartzo com distância interplanar basal de 3,34 Å, mica com distância interplanar de 14,12 Å e feldspato com distância interplanar basal de 3,18 Å.

4.2 FRX DOS AGREGADOS

A Tabela 04 apresenta as composições químicas das amostras estudadas na pesquisa, obtidas com o FRX (Fluorescência de Raios X).

Tabela 4 – Composição química das amostras.

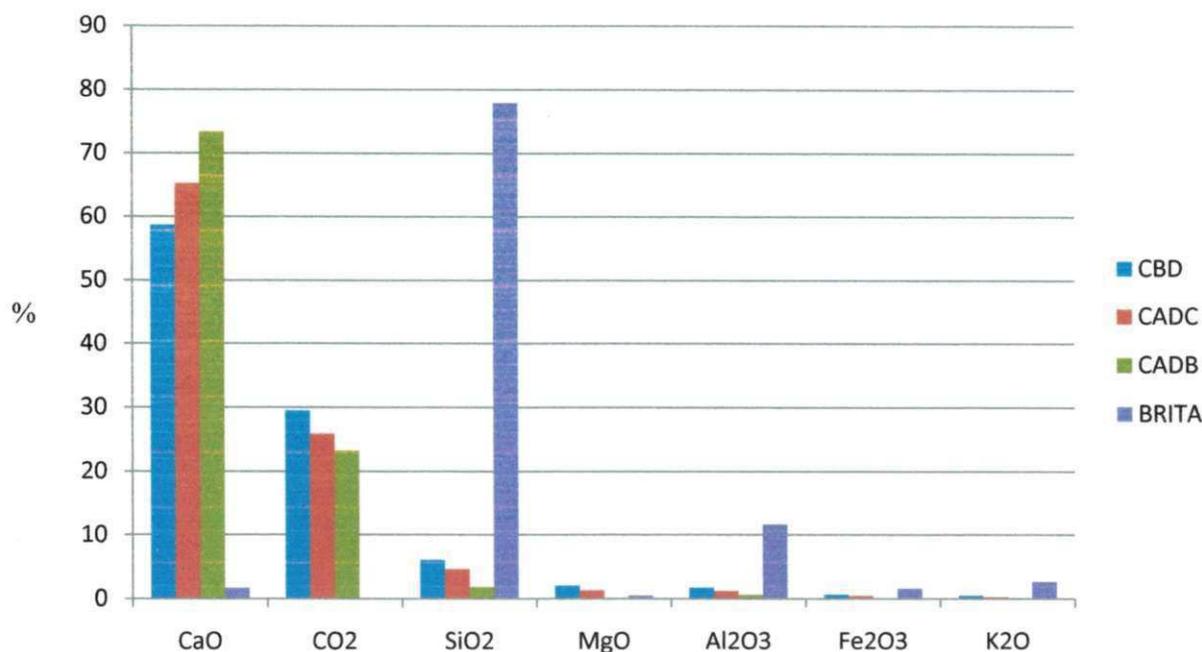
Composto	CBD ¹	CADC	CADB	BRITA
CaO	58,67	65,27	73,34	1,65
CO ₂	29,51	25,86	23,24	0,00
SiO ₃	6,07	4,58	1,84	77,92
MgO	2,08	1,30	0,00	0,48
Al ₂ O ₃	1,73	1,22	0,66	11,61
Fe ₂ O ₃	0,64	0,47	0,07	1,61
K ₂ O	0,49	0,23	0,03	2,66
Na ₂ O	0,00	0,16	0,00	3,54

¹Valores percentuais (%)

A composição química dos agregados estudados na pesquisa está de acordo com os resultados da literatura, como também, corresponderam as expectativas.

A Figura 27 apresenta o gráfico com os principais elementos químicos constituintes das amostras (agregados) estudados na pesquisa.

Figura 27 – Gráfico dos elementos químicos dos agregados.



O gráfico da Figura 27, que trata da composição química dos agregados, ajuda no entendimento da classificação dos tipos de rochas estudadas na pesquisa, no que se refere à quantidade de SiO₂, quando o teor percentual da composição for $\geq 75\%$, a rocha é classificada como sobresaturada ou ácida, já as

rochas consideradas básicas ou subsaturadas é quando o teor de SiO_2 for $\leq 50\%$. Neste caso, considera-se como rocha ácida, a brita granítica, e rocha básica o calcário, sendo ele de alta densidade e de baixa densidade, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação das rochas em relação à quantidade de SiO_2 .

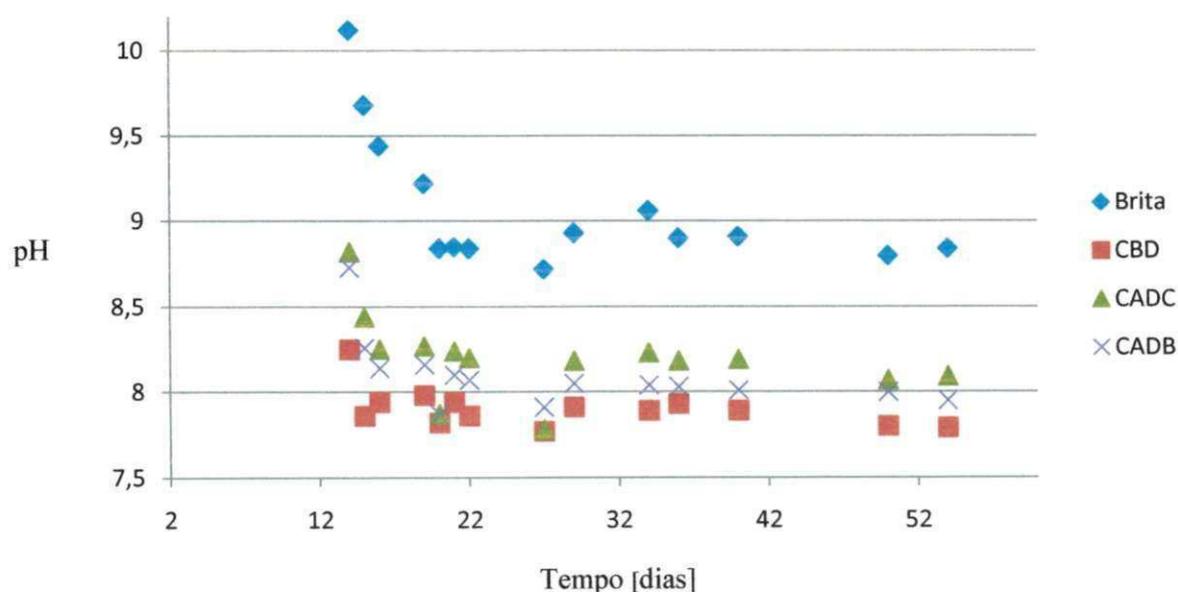
Agregado	CBD ¹	CADC	CADB	BRITA
SiO_2	6,07	4,58	1,84	77,92
	$\leq 50\%$	$\leq 50\%$	$\leq 50\%$	$\geq 75\%$
Classificação	básica	básica	básica	ácida

¹Valores percentuais (%)

4.3 pH DOS AGREGADOS

A Figura 28 mostra os resultados do pH dos quatro tipos de agregados utilizados na pesquisa.

Figura 28 – Gráfico das medições do pH das amostras por 45 dias.



Em análise do gráfico da Figura 28, percebe-se que os valores do pH das amostras contradizem com a teoria sobre a classificação das rochas em relação a sua acidez, que depende da concentração da SiO_2 em sua composição, porém, o que influenciou significativamente nos resultados foi a solubilidade em água do

próprio SiO₂, que é em torno de 0,012 g em 100 ml de água, já o Ca(OH)₂, composto encontrado abundantemente nos tipos de calcário, este tem uma solubilidade bem maior em relação a sílica, em torno de 0,185 g em 100 ml de água. Certamente, as soluções não se estabilizaram em um período de 45 dias.

4.4 MASSA ESPECÍFICA E ABSORÇÃO DOS AGREGADOS

A tabela 6 mostra o resultado dos valores de massa específica seca, massa específica sobre superfície saturada e absorção para cada tipo de agregado utilizado na pesquisa.

Tabela 6 – Massa específica e absorção dos agregados

Ensaio	CBD	CADC	CADB	BRITA
Massa específica seca [g / ml]	2,43	2,72	2,69	2,75
Massa específica SSS	2,39	2,65	2,65	2,77
Absorção (%)	0,7%	0,5%	0,55%	0,4%

Os resultados de massa específica real comprova a denominação de calcário de alta densidade da região do Cariri Cearense, o CADC foi identificado como o mais denso em relação ao CADB e o CBD.

4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS CONCRETOS

Os concretos preparados com os diferentes tipos de agregados foram submetidos ao ensaio de compressão nos corpos-de-prova de 35 mm de diâmetro e 70 mm de altura, foram preparados 6 corpos-de-prova de cada tipo de concreto e feito uma média aritmética dos resultados obtidos.

A Tabela 7 mostra os resultados de resistência mecânica dos concretos preparados com os diferentes agregados.

Tabela 7 – Resistência mecânica dos concretos

Tipo do Concreto	Resistência (MPa)
CADB	16,89
CADC	22,95
CBD	15,91
BRITA	19,24

O concreto preparado com o agregado convencional, a brita granítica, apresentou uma média de resistência mecânica de 19,24 MPa, como previsto, o concreto preparado com o calcário de baixa densidade, apresentou resistência mecânica de 15,91 MPa, cerca de 17,30% menos resistente, já os concretos preparados com os calcário de alta densidade apresentaram resultados positivos, o calcário de alta densidade cinza de destacou com aumento de 16,16% na resistência mecânica em relação ao convencional, o calcário de alta densidade branco, apresentou pequeno aumento na resistência em comparação com o padrão.

4.6 MEV DOS CONCRETOS (ZONA DE TRANSIÇÃO)

A microscopia eletrônica de varredura foi responsável pela análise da microestrutura dos concretos preparados com os agregados estudados neste trabalho, especificamente a zona de transição.

4.6.1 Zona de transição do concreto preparado com CBD

As Figura 29 a Figura 32 mostram a zona de transição do concreto preparado com o calcário de baixa densidade como agregado graúdo em diferentes pontos de foco e diferentes escalas apresentadas.

Figura 29 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x100).

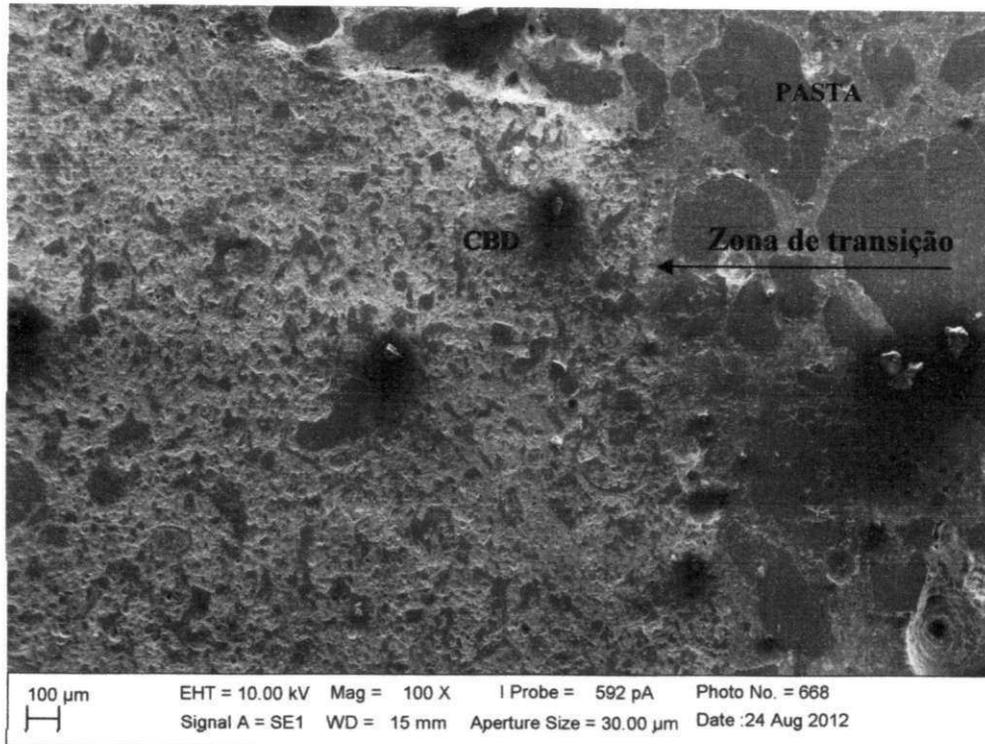


Figura 30 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x500).

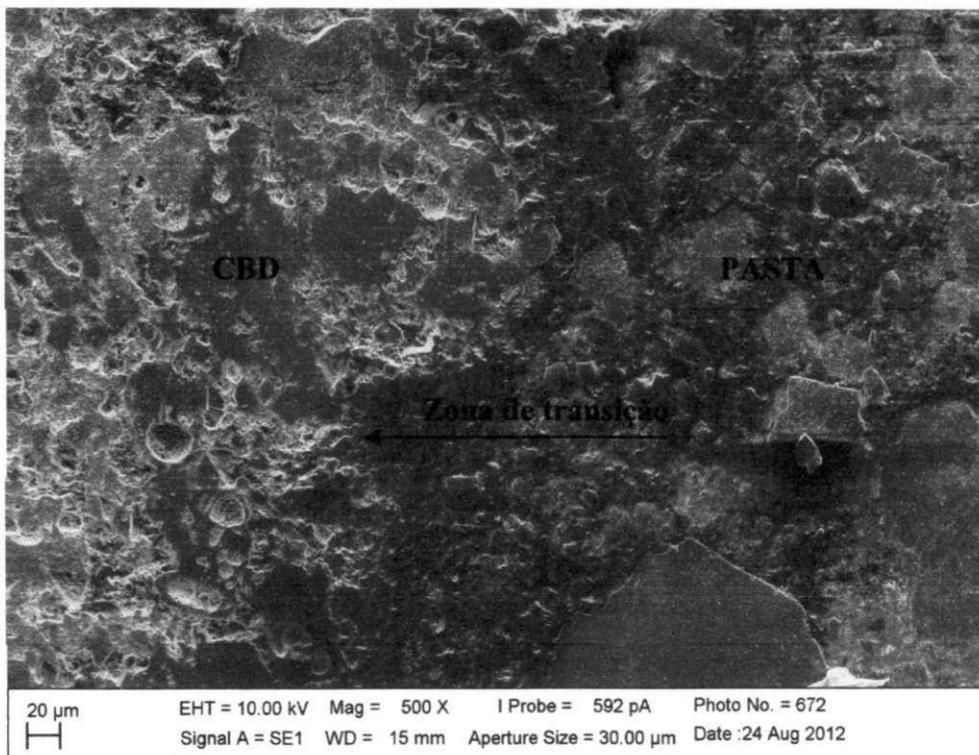


Figura 31 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x1000).

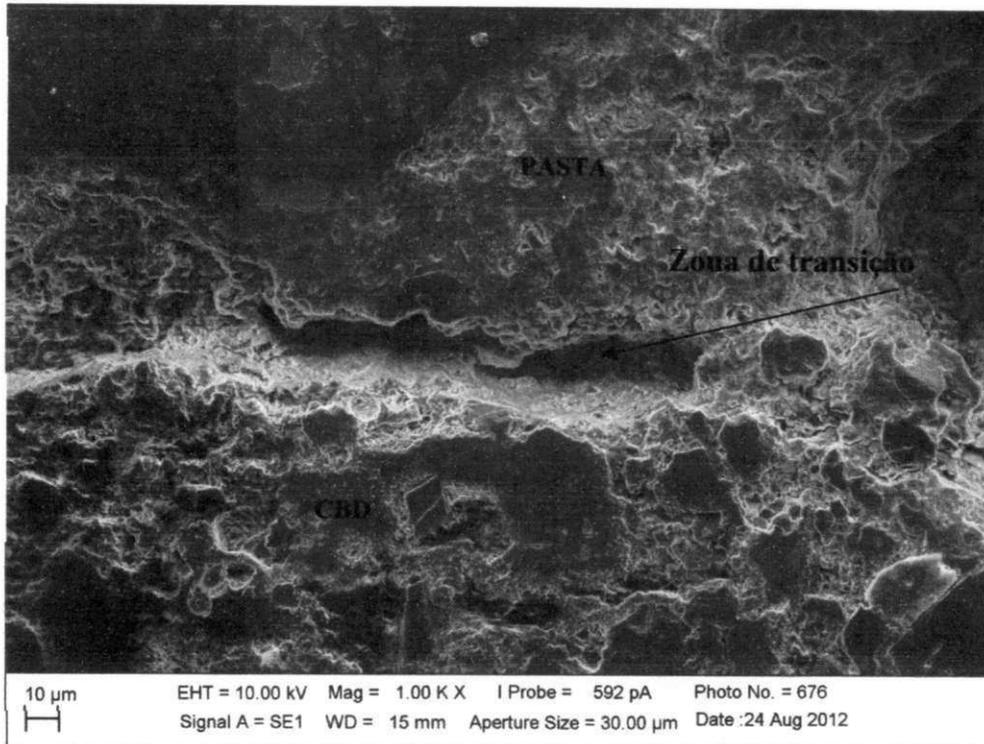
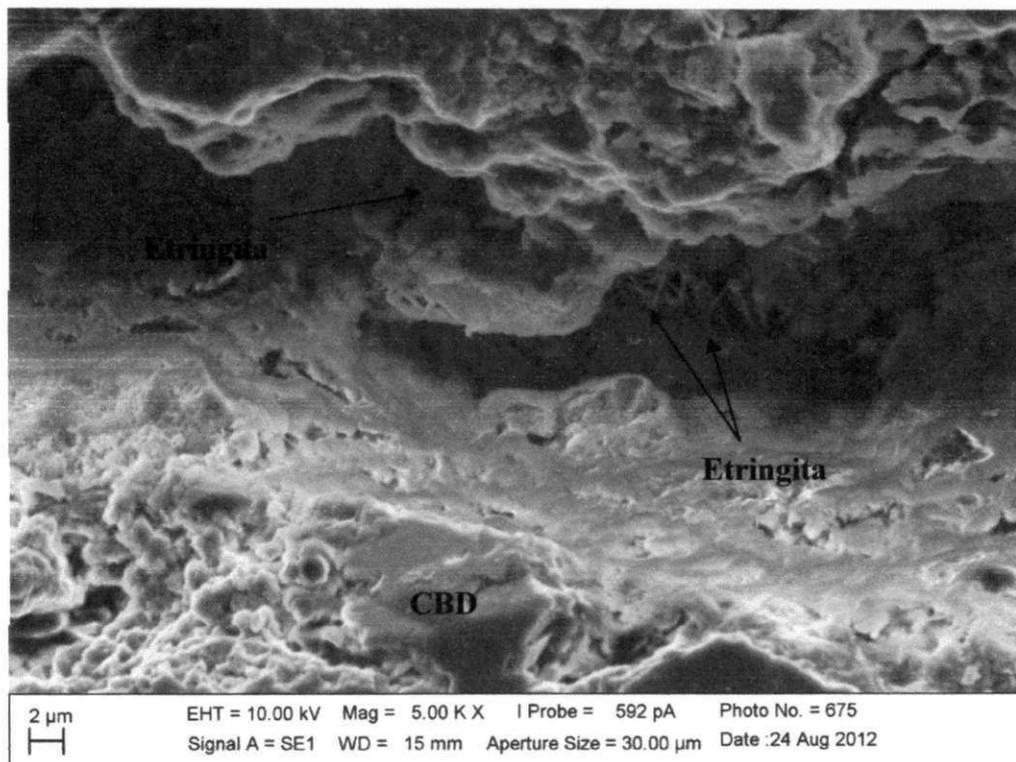


Figura 32 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CBD (Magnitude: x5000).



As micrografias por elétrons secundários da zona de transição dos concretos preparado com CBD (Calcário de Baixa Densidade) mostraram, em geral, uma zona de transição bem uniforme, que é facilmente visualizada nas Figura 29 e 30, pouco porosa, sem trincas ou fissuras. A uniformidade da zona de transição desse concreto foi a melhor apresentada, ou seja, pouco se percebe a presença de mais uma fase entre a pasta e o agregado.

A Figura 31 mostra uma espessura considerável, cerca de 20 μm , porém, não se caracteriza uma trinca ou fissura e sim parte do volume de porosidade interna da zona de transição, nesta mesma imagem, aumentando o zoom, a Figura 32, identifica cristais de etringita, composto comum na zona de transição.

4.6.2 Zona de transição do concreto preparado com CAD

As Figura 33 a Figura 36 mostram a zona de transição do concreto preparado com o calcário de alta densidade cinza como agregado graúdo em diferentes pontos de foco e diferentes escalas apresentadas.

Figura 33 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x100).

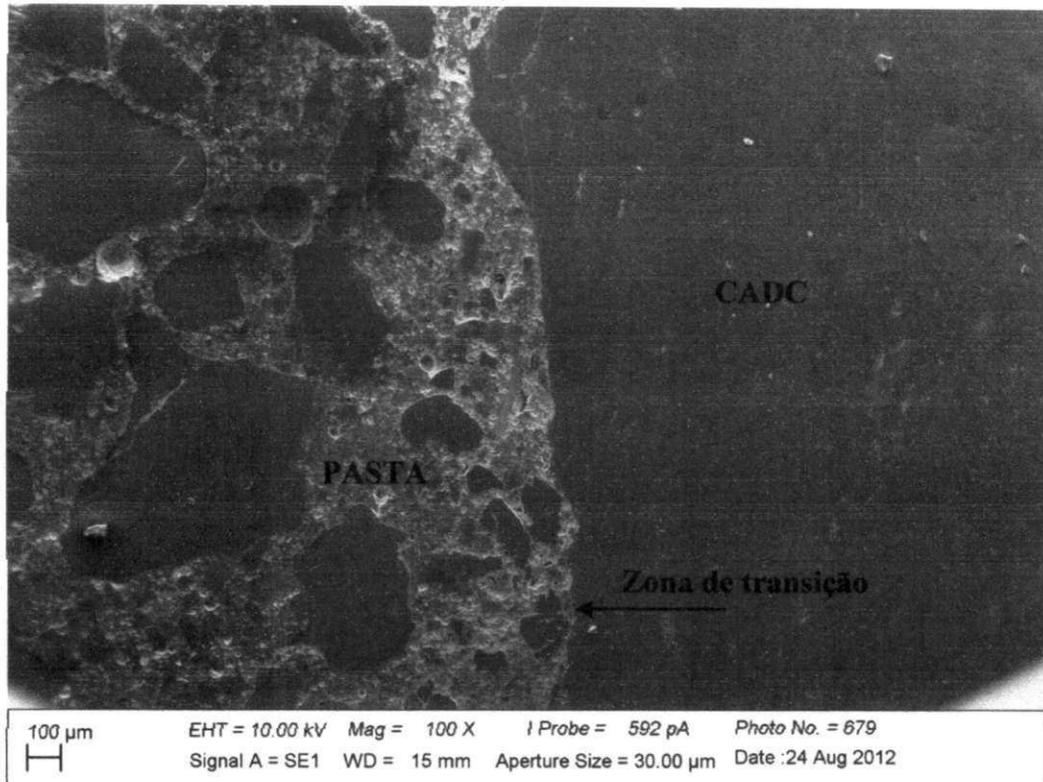


Figura 34 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x500).

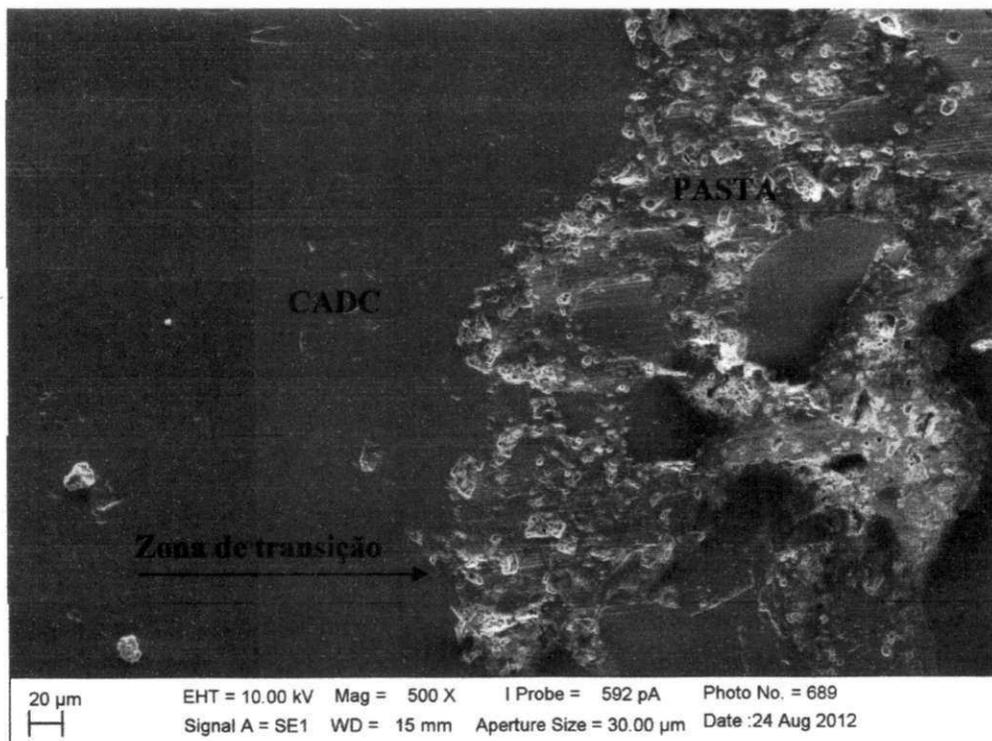


Figura 35 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x1000).

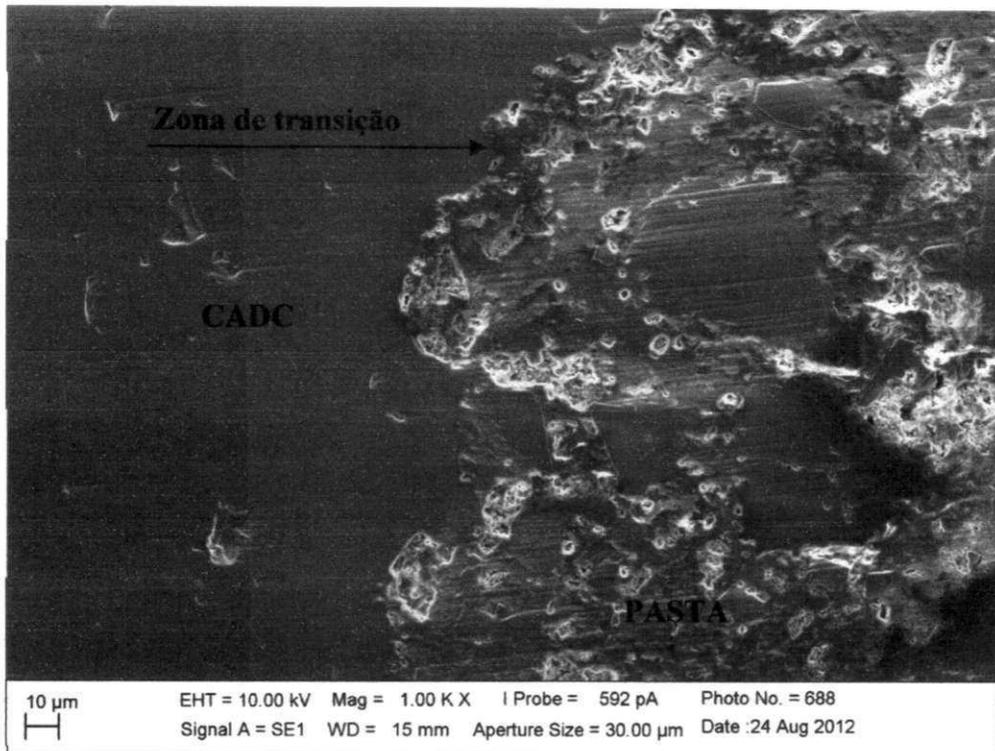
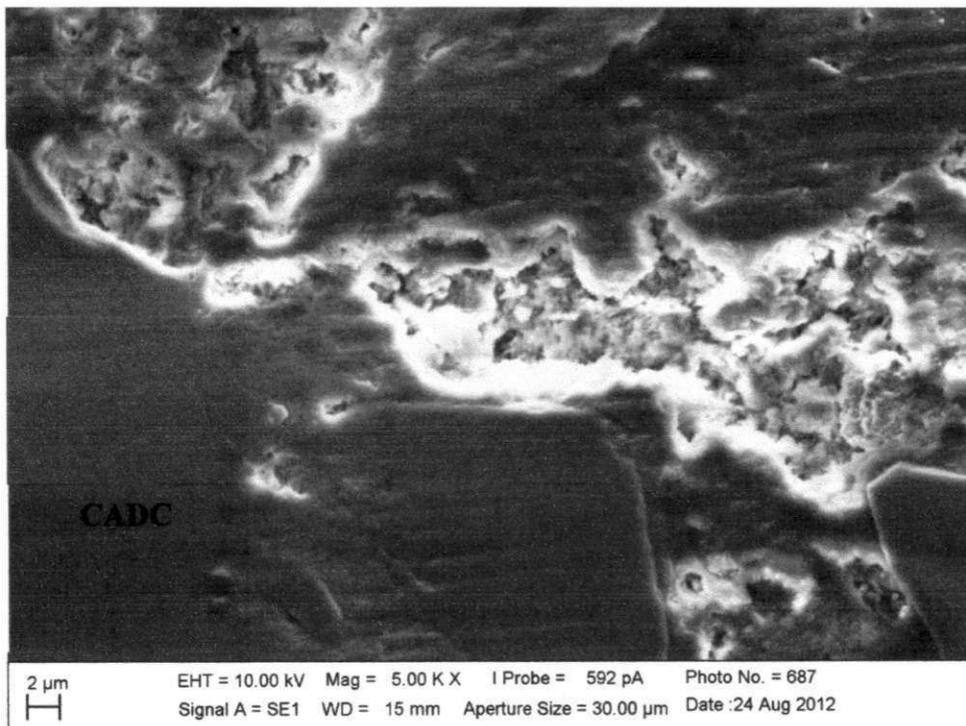


Figura 36 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADC (Magnitude: x5000).



As micrografias por elétrons secundários da zona de transição dos concretos preparado com CADC (Calcário de Alta Densidade Cinza) mostraram, em geral, uma zona de transição com relativa uniformidade, que é visualizada nas Figuras 33 e 34, porosa, porém, ainda sim, sem trincas ou fissuras consideráveis. A uniformidade da zona de transição desse concreto foi boa, porém, ao longo da zona de transição foi encontrado porosidade na interface.

A Figura 35 mostra a zona de transição com regiões porosas, porém, não é possível identificar trincas na interface.

Percebe-se, que a superfície do agregado citado, após os procedimentos de lixamento e polimento apresentaram uma característica bem uniforme, pouco porosa e lisa, conseqüentemente bem densa, diferente do que aconteceu com o CBD, que apresentou uma superfície porosa e rugosa.

4.6.3 Zona de transição do concreto preparado com CADB

As Figura 37 a Figura 40 mostram a zona de transição do concreto preparado com o calcário de alta densidade branco como agregado graúdo em diferentes pontos de foco e diferentes escalas apresentadas.

Figura 37 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x100).

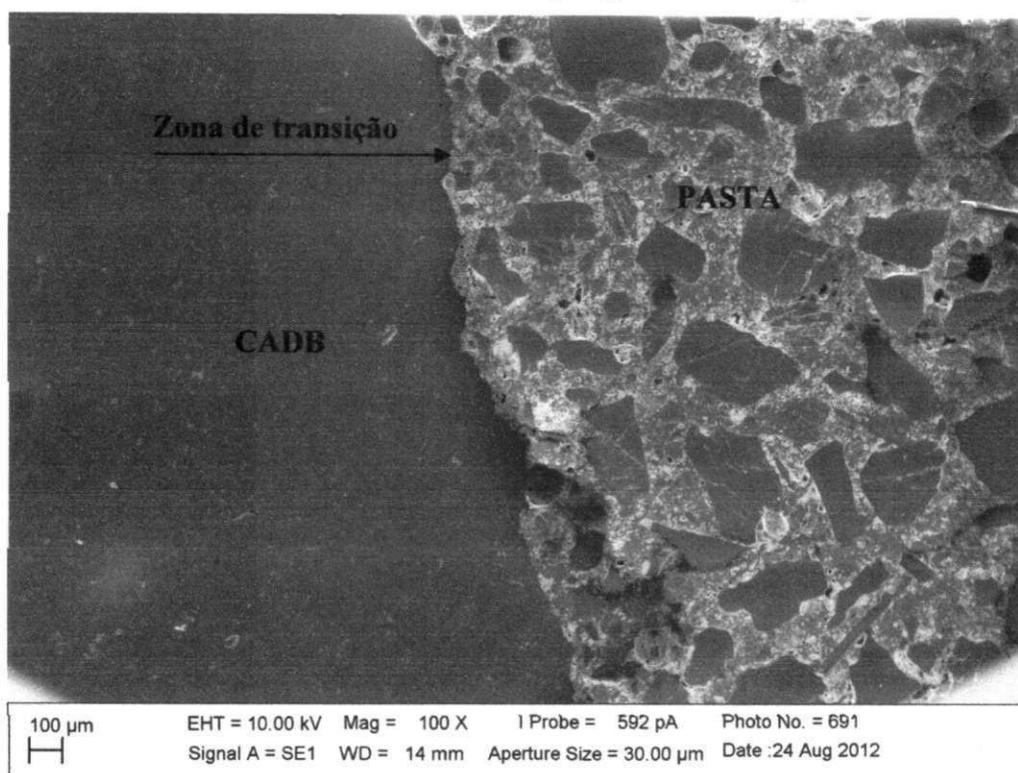


Figura 38 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x500).

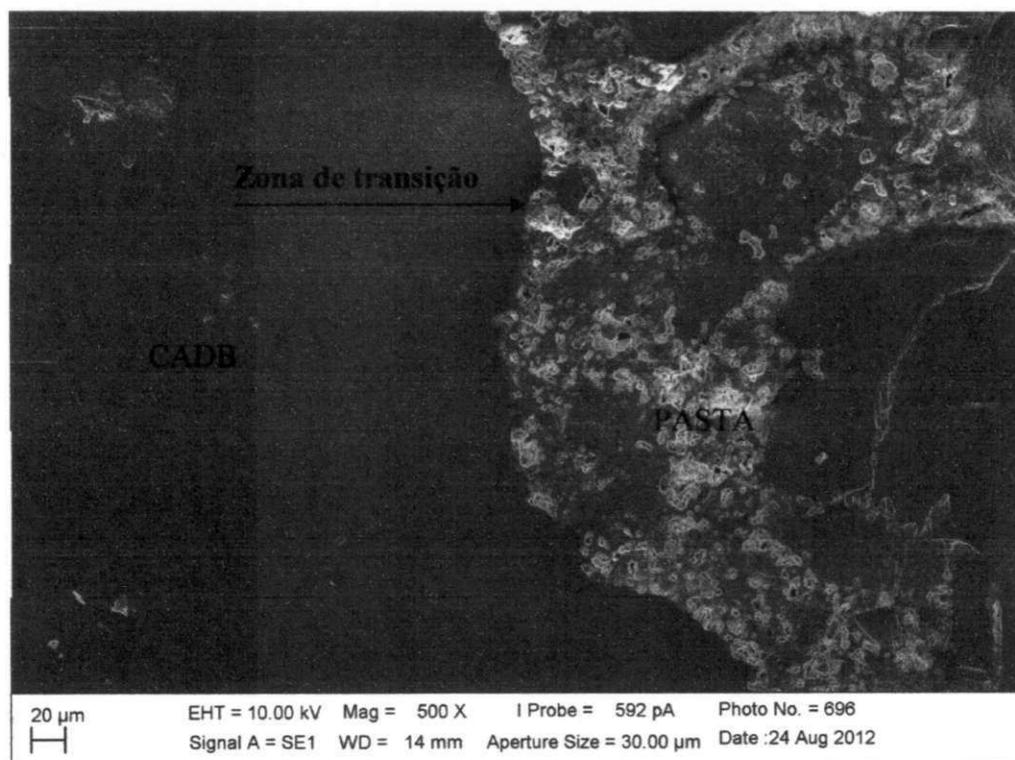


Figura 39 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x1000).

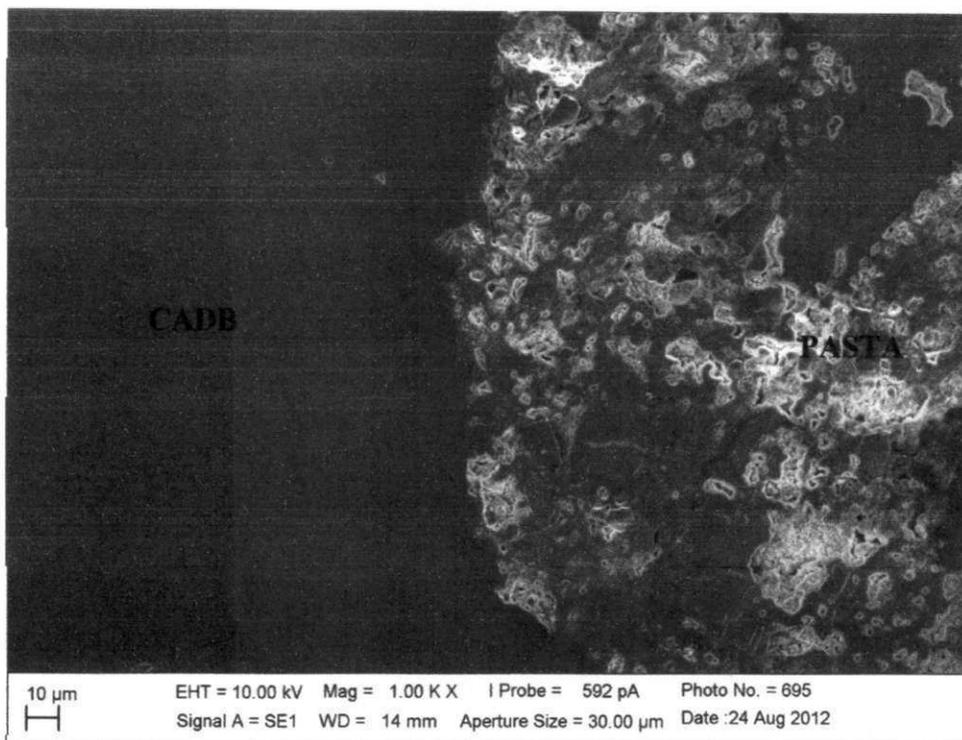
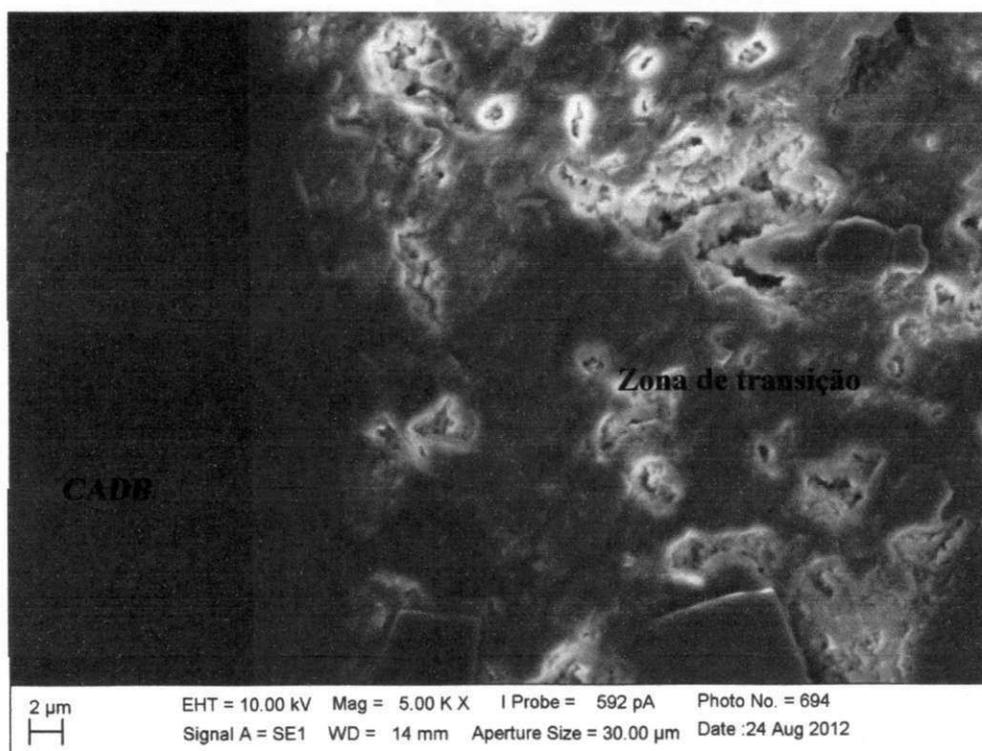


Figura 40 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com CADB (Magnitude: x5000).



As micrografias por elétrons secundários da zona de transição dos concretos preparado com CADB (Calcário de Alta Densidade Branco) mostraram, em geral, uma zona de transição bem parecida com o concreto preparado com CADC: relativa uniformidade, que é visualizada nas Figuras 37 e 38, sem trincas ou fissuras consideráveis, porém, a zona de transição deste concreto apresentou menos regiões com porosidade, como observado nas Figuras 39 e 40.

Como no concreto preparado com CADB, neste concreto percebe-se também, que a superfície do agregado, após os procedimentos de lixamento e polimento apresentaram uma característica bem uniforme, pouco porosa e lisa, conseqüentemente bem densa.

4.6.4 Zona de transição do concreto preparado com BRITA

As Figura 41 a Figura 44 mostram a zona de transição do concreto preparado com a brita granítica, que é o agregado graúdo de referência utilizado pelo trabalho, foram obtidas imagens de diferentes pontos de foco e diferentes escalas apresentadas.

Figura 41 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x100).

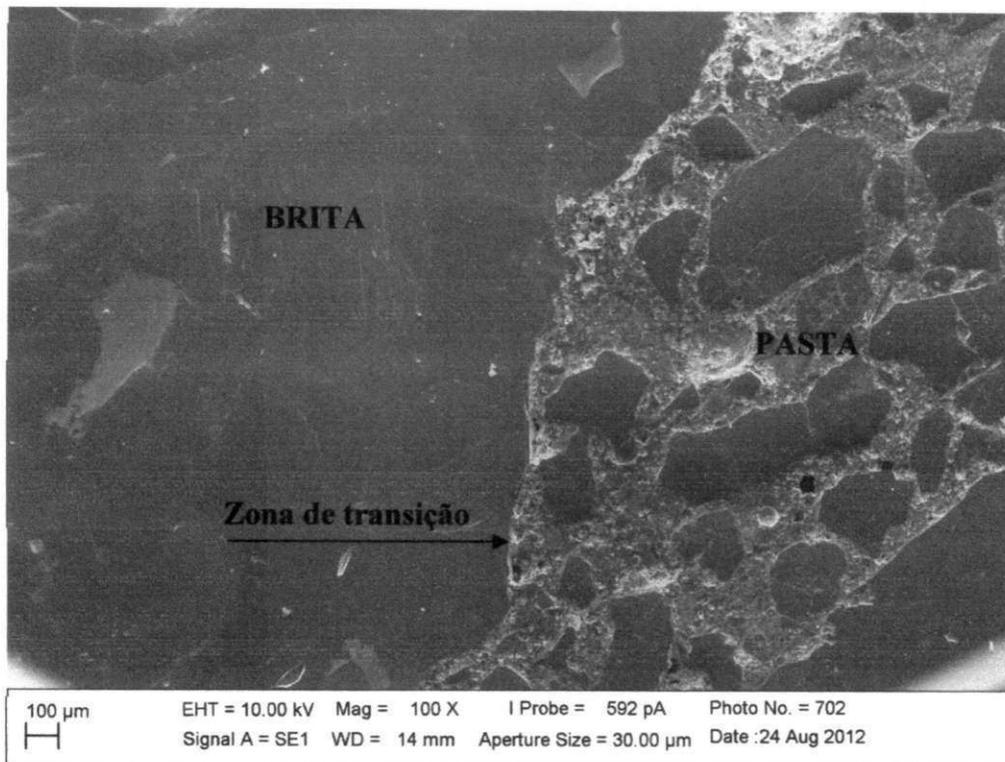


Figura 42 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x500).

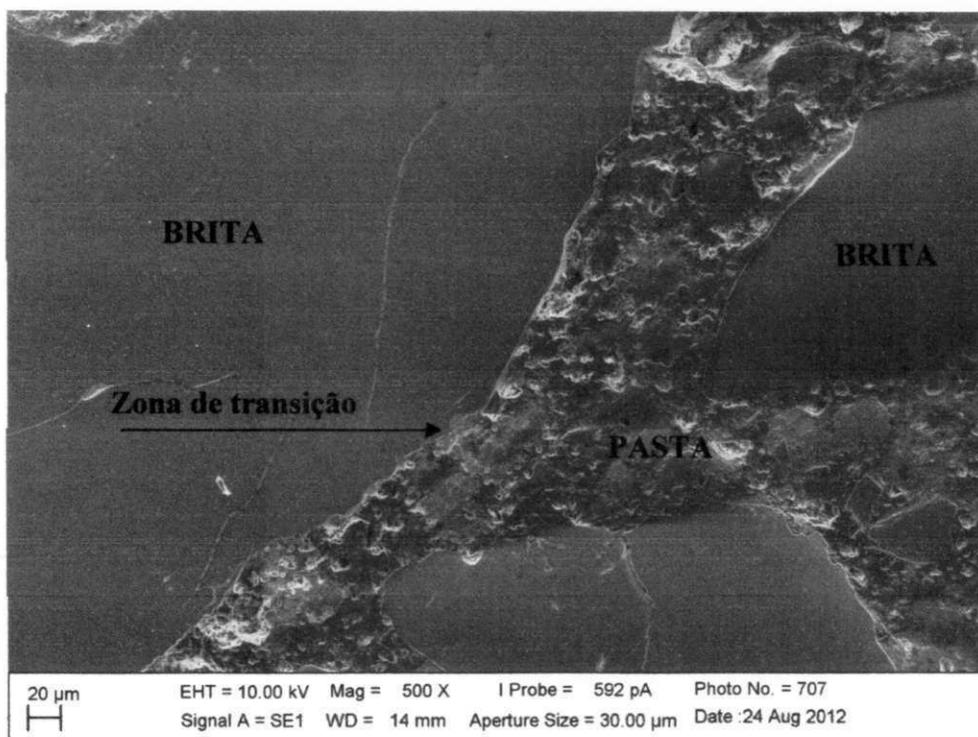


Figura 43 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x1000).

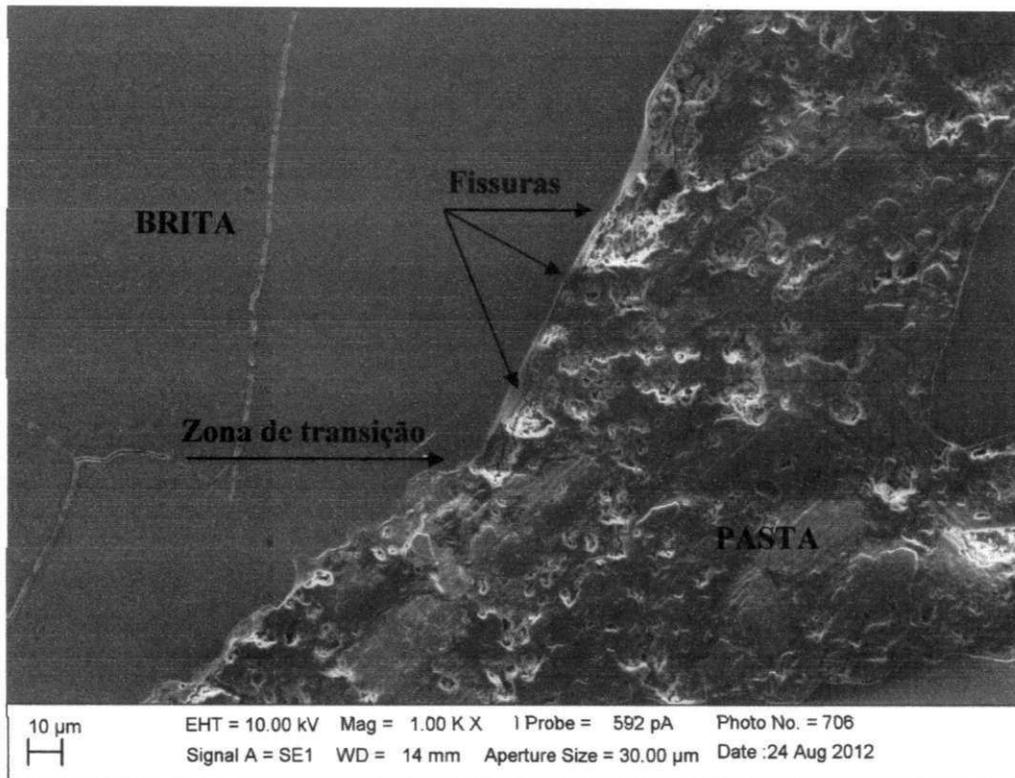
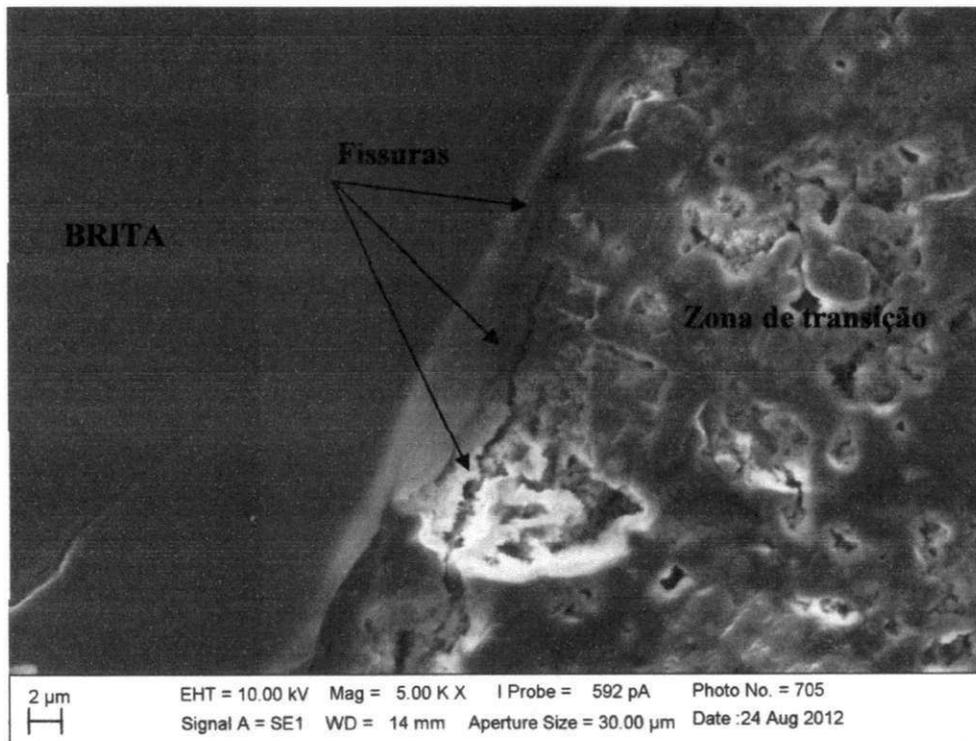


Figura 44 – Micrografia por elétrons secundários da zona de transição do concreto preparado com BRITA (Magnitude: x5000).



As micrografias por elétrons secundários da zona de transição dos concretos preparado com BRITA, agregado graúdo de referência, mostraram, em geral, uma zona de transição com porosidade parecida com as dos outros tipos de concreto, conforme Figuras 41 e 42, o que diferenciou realmente foi a presença de trincas e fissuras na interface agregado / pasta, estas trincas apresentaram uma continuidade ao longo da zona de transição, fato este que foi visualizado nas Figuras 43 e 44.

Como nos concretos preparados com calcários de alta densidade, neste concreto com BRITA percebe-se também, que a superfície do agregado, após os procedimentos de lixamento e polimento apresentaram uma característica bem uniforme, pouco porosa e lisa, conseqüentemente bem densa.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho buscou-se:

“análise macro e microestrutural de concretos preparados com calcário de alta resistência”.

Conclusões extraídas a partir dos resultados obtidos:

1. o uso do calcário de alta resistência como agregado graúdo em concretos altera a formação e as características da zona de transição em relação aos concretos preparados com agregado convencional: diminuindo a porosidade, apresentando baixa ocorrência de trincas ou fissuras e apresenta melhor uniformidade;
2. o uso de calcário de baixa densidade como agregado graúdo em concretos altera também a formação e as características da zona de transição em relação aos concretos preparados com agregado convencional: porosidade bem menor, excelente interação entre pasta e agregado, ausência de fissuras ou trincas, porém, apresenta resistência mecânica inferior em relação aos concretos convencionais; e
3. em conformidade com as características da zona de transição, a resistência mecânica dos concretos preparados com os dois tipos de calcário de alta densidade foi superior em comparação com o concreto preparado com o agregado convencional, a brita granítica, o CADC apresentou melhor resistência, com 16% a mais que o concreto com brita granítica.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- a) aprofundar uma análise específica sobre a formação do C-S-H na zona de transição em concretos preparados com calcário de alta resistência;
- b) avaliar a variação da espessura da zona de transição em concretos preparados com calcário, como agregado graúdo, em relação aos concretos convencionais; e
- c) correlacionar o comportamento da zona de transição de concretos com o pH do agregado utilizado, especificamente no que tange a formação, na interface agregado/pasta, do C-S-H.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AÏTCIN, P.-C. **Concreto de alto desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo – Editora Pini, 2000.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.

CASTRO, A. L. C. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. Doutorado (Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, EESC / IQSC/ IFSC, Universidade de São Paulo).

CHERMANT, J. L. **Why automatic image analysis, an introduction to this issue**. Cement & Concrete Composites, Vol. 23 , pp. 127-131, 2001.

COSTA, C. et al. **Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Eletrônica de Varrimento**. In. Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, nº 3/4, 2009.

DALMOLIN, D. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas de concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. Tese (doutorado em Engenharia dos Materiais), USP – Escola de Engenharia, São Carlos, 1995.

DIAMOND, S. **Aspects of concrete porosity revisited**. Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.1181-1188, 1999.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FAGURY, S. C. **Concretos e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concretos novo e velho com tratamento de interface**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), USP – Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.

FARRAN, J. **Contribution minérlogique á l'adhérence entre constituants hydrates des cimens et lês matériaux enrobés** Revue des matériaux des constructions, 1956.

- FREAS, R. C. **Rocks minerals**. In: Industrial Minerals and Rocks. Donald D. Carr (Senior Editor), Society of Mining, Engineers, Littleton, Colorado. 1994.
- FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.
- FREITAS JR, J. A. **Estrutura interna do concreto – microestrutura**. Notas de aula, Centro de Tecnologia – Engenharia dos Materiais. UFPR. Curitiba, 2008.
- GENGIYNG, L. HUICAIS, X. GUANGJING, X. **Transition zone studies of new-to-old concrete with diferent binders**. In: Cement & Concrete Composites, nº 23, 2001.
- HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. PINI, São Paulo, 1992.
- HEWLETT, P. C. *et al.* **Lea's chemistry of cement and concrete**. Burlington: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2004.
- KAEFER, L. F. BRASIL. Escola politécnica da USP. **Considerações sobre a microestrutura do concreto**. São Paulo, 2002 (Boletim Técnico).
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008.
- MELO, L. R. L. **Reciclagem do resíduo da produção de rochas ornamentais calcárias para uso carga matriz polimérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), UFCG, Campina Grande, 2008.
- MELO, A. B.; LIBORIO, J. B. L. **Influência do teor de adição de sílica amorfa (ligas de Ferro-Silício) nas propriedades mecânicas em pastas de cimentos Portland de alta resistência inicial**. In: 42º Congresso Brasileiro de Cerâmica & 4º Iberico Americano de Cerâmica, vidros e refratários, Poços de Caldas, 1998.
- MONTEIRO, P. J. M. **Caracterização da microestrutura do concreto: Fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microestrutura**. Tese livre docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- MORANVILLE, R. M. **Microstructure of high performance concrete: Malier y High performance concrete**. London, 1992. 3-13p.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

- OLIVEIRA, A. A. Calcários Laminados do Cariri: **Estudo para redução de perdas n lavra e aproveitamento do rejeito mineral**. Fortaleza: UFC. Centro de Ciências Departamento de Geologia. Curso de Mestrado em Geologia, 1998, 160p. (Dissertação de Mestrado).
- PONTE, F. C.; APPI, C. J. **Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da bacia do araripe**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal, 1990, Anais do 36 Congresso Brasileiro de Geologia, Sociedade Brasileira de Geologia, Natal, 1990, v. 1, p. 211-226.
- RIBEIRO, R. C. C. **Utilização do calcário do Cariri cearense como agregado mineral em pavimentação asfáltica**. Rio de Janeiro: CETEM, 2006.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos: dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. Tese (doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Rochas e minerais industriais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2008.
- SCHNELLRATH, J.; ANDRADE, M.; ALVARENGA JUNIOR, L. P. e GOULART, R. C. **Cimento Holdercim**. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. Editores: João Alves Sampaio, Adão Benvindo da Luz e Fernando Freitas Lins, CETEM/MCT, p. 175-185, 2001.
- SCRIVENER, K. L., **Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification**, Cement and Concrete Composites, 2004.
- SILVA, I. J. **Contribuição ao estudo dos concretos de alto desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade, microestrutura**. Tese (doutorado em Engenharia de Materiais), USP – Escola de Engenharia de São Carlos, 2000.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press Limited, 1990.
- UCHIKAWA, H. **Characterization and material design of high-strength concrete with superior workability**. Cement Technology. In: 8º International Congress on the Chemistry of Cement, vol. I, 1986.

VASCONCELOS, A. C. de. **O concreto armado no Brasil**: pré-fabricação, monumentos e fundações. São Paulo: Studio Nobel, 2002.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M. **A indústria extrativa da pedra Cariri no Estado do Ceará**: problemas x soluções. In: IV SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, Fortaleza, **anais**, 2003.

VIVEKANDAM, K. PATNAYKUNY, I. **Transition zone in high performance concrete during hydration**. In: Cement and Concrete Research, vol 27, 1997.