

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

POLINE FERNANDES FIALHO

**CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E
GÁS. ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM
CONCRETO.**

VITÓRIA

2012

POLINE FERNANDES FIALHO

**CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E
GÁS. ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM
CONCRETO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão

Coorientador: Prof. Dr. Evaristo Nunes Filho

VITÓRIA

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

F438c Fialho, Poline Fernandes, 1980-
Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Estudo do potencial de aplicação em concreto / Poline Fernandes Fialho. – 2012.
217 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon.

Coorientador: Fernando Avancini Tristão, Evaristo Nunes Filho.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Poços de petróleo. 2. Resíduos como material de construção. 3. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Calmon, João Luiz. II. Tristão, Fernando Avancini. III. Nunes Filho, Evaristo, 1951-. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. V. Título.

CDU: 624

POLINE FERNANDES FIALHO

**CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E
GÁS. ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Aprovada em 04 de maio de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Evaristo Nunes Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dra. Geilma Lima Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora Interna

Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Examinadora Externa

Prof. Dra. Flávia Maria Marconi
Dra. Engenharia e Ciência dos Materiais
Examinadora Externa - Petrobras

Aos meus sonhos.

Agradecimentos

Muitas pessoas tornaram essa jornada mais fácil e gostaria de agradecê-las por isso.

Inicialmente ao meu sempre presente orientador, amigo e mestre de todos os dias, Calmon. Com seus ensinamentos técnicos e de vida, filosóficos e empíricos, mesmo em momentos difíceis, me fez enxergar que a pesquisa é um universo singular. Por saber que não somos cachorros de palha, agradeço a DEUS por ter me encorajado a convergir para este caminho.

O rei da paciência e dedicação, professor Avancini, meus profundos agradecimentos por dividir sua sala, seus conhecimentos e seu disputado tempo.

A pequena de coração grande, Geilma, que com sua simplicidade me ensinou técnicas e lições de vida. A professora Georgia que teve paciência com meus múltiplos questionamentos e dividiu conhecimentos, materiais de aula e estudo. À professora Jamilla pelos conhecimentos reológicos, revisão dos textos em inglês e alegria ao grupo.

Ao professor Evaristo, Alfredo, ao Gustavo e aos demais do Laboratório de Materiais Carbonosos e Laboratório de Plasma Térmico que muito contribuíram na parte de caracterização.

A exemplar Cris que "sustentou" meus primeiros passos. Ao professor Adelmo pela lembrança estatística. Ao professor Luiz Machado, químico, pela enorme paciência, horas de conversa e análises de infravermelho no LABPETRO.

Ao professor Honério que mesmo em sua correria dispensou momentos preciosos para minha formação. Ao professor Luiz Machado, geólogo, pelo auxílio na investigação dos minerais. Ao professor Ronaldo Pacheco Feu Rosa do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES pelos ensaios de módulo de elasticidade. Aos professores Marcelo Camargo, Cherlio, Flávio, Temístocles, Tereza, Geisamanda, Eustáquio, Aloir, Patrício Pires por diversas contribuições.

Aos colaboradores dos laboratórios Loriato, Carlos Izoton, Márcio Loss, Sebastião, Miguel, Jorge, Denise, Manoel, Nishida, Tales e Zampiele. À querida Xuxa pelo carinho e cuidado.

Aos meus alunos de Iniciação Científica em especial ao sempre disposto Max, à Uliane, e ao Valdeir. E também aos sempre presentes Álvaro e Sérgio.

À secretaria do mestrado que me aturou com meus inúmeros e-mails. Obrigada mesmo Sidney, Vinícius, Ingrid e Pedro. Além da professora Marta que aguentou meus pedidos para divulgação da pesquisa nos diversos congressos.

Aos meus colegas de turmas que me fizeram sentir única no meio de engenheiros e arquitetos.

À FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS e seus colaboradores Eng. Emídio, Geóloga Heloísa, Química Marlei e a técnica Fernanda pelos preciosos dias de estágio.

As empresas ARGALIT, Holcim, MIZU, Nassau, Vitória Ambiental, pelos materiais e apoio na pesquisa. Em especial à Petrobras pelo material, viagem à campo, dezenas de reuniões e divisão do conhecimento por meio dos seus colaboradores Marcelo Veronez, Norberto, Fabiano, Flávia Marconi por sua disponibilidade e gentileza, Patrícia e Luiz Otávio na elaboração do projeto que me viabilizou partes importantes na pesquisa.

À professora doutora Denise Dal Molin por ter aceito o convite para compor a banca e suas preciosas contribuições na defesa.

Ao meu querido esposo que sempre teve paciência, me incentivou e escutou minhas "grandes ideias". À minha mãe "fundação profunda" dos meus sonhos.

Aos meus alunos que me incentivaram a estudar cada dia mais.

À CAPES e ao PRPPG pelo apoio financeiro.

À UFES pela estrutura disponibilizada.

Finalmente, a todos que de uma maneira ou de outra, contribuíram para que este sonho fosse alcançado.

Poline Fernandes Fialho

“Nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

Lavoisier, 1760.

FIALHO, Poline Fernandes. **CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS. ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO EM CONCRETO.** 2012. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

RESUMO

A perfuração de poços de petróleo gera diversos resíduos entre os quais estão os fluidos e cascalhos de perfuração. A administração desses resíduos tem sido um problema para a indústria de petróleo e gás por causa da quantidade gerada e seus contaminantes, que podem ser orgânicos e inorgânicos. Os estudos para o reuso do cascalho em materiais de construção são recentes. Eles apontam alternativas para a construção de sub-base de pavimentação, materiais cerâmicos e a base de cimento. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de dois tipos de cascalhos em substituição e adição em concretos não armados. Foram realizados ensaios para caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos e em especial no cascalho de perfuração, além dos ensaios de controle tecnológico nos concretos. Os resultados apontaram que o uso dos cascalhos em materiais a base de cimento é vinculado à sua caracterização prévia. A substituição dos cascalhos da primeira fase da perfuração por areia altera significativamente a reologia do concreto fresco. As proporções testadas não comprometem as propriedades mecânicas dos concretos. Alterações na microestrutura só foram observadas nos concretos com adição de cascalhos da terceira fase da perfuração. Essas se tornaram mais porosas e a formação dos compostos hidratados se deu de forma mais lenta. O método qualitativo de detecção de cloretos não identificou cloretos livres nas amostras de concreto. Pode-se concluir que é possível a substituição de cascalhos de perfuração em concretos nos teores testados.

Palavras-chave: Cascalho de perfuração, Caracterização, Resíduos, Reciclagem.

ABSTRACT

The drilling of petroleum wells generates many residues such as waste fluids and drill cuttings. The management of those drilling wastes has been a problem to the petroleum and gas industry not only due to the significant amount of residues generated but also due to the presence of both organic and inorganic contaminants in their composition. Studies for the reuse of drill cuttings in building materials are recent. They show possible alternatives of use of this material such as in pavement sub-base layers, in ceramic materials, and in cement-based materials. This research aimed to evaluate the behavior of two types of drill cuttings as a replacement and as an addition in unarmored concrete. Laboratory tests were performed to characterize the materials used in the concrete fabrication, in particular the drill cuttings, as well as control testing in concrete technology. The obtained results in this research showed that the interactions of drill cuttings with cement-based materials are related to their previous characterization. The replacement of sand by drill cuttings from the first phase of well drilling in the concrete mixture significantly changes the rheology of fresh concrete. The proportions tested did not compromise the concrete mechanical properties. Changes in concrete microstructure were only observed in the concrete samples with the addition of drill cuttings from the third phase of well drilling process. Those have become more porous and the formation of hydrated compounds occurred more slowly. The method of qualitative detection of free chloride did not identify chlorides in the concrete samples. Finally, it can be concluded that it is possible either the replacement of drill cuttings in concrete considering the levels tested in this study.

Keywords: Drill Cuttings, characterization, waste, recycle.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Sonda de perfuração	34
Figura 2.2 – Esquema simplificado de uma sonda	34
Figura 2.3 – Esquema de um poço de 2 fases	35
Figura 2.4 – Esquema de um poço de 3 fases	35
Figura 2.5 – Sistema de controle de sólidos	37
Figura 2.6 - Sistema típico de separador de sólidos	38
Figura 2.7 - Pavimento tipo PAVI-S	57
Figura 2.8 - Área de exploração e produção de petróleo e gás no Espírito Santo.....	60
Figura 3.1 – Estratégia inicial para o planejamento de um experimento	63
Figura 3.2 – Programa experimental	66
Figura 3.3 – Programa Experimental - Concretos.....	67
Figura 3.4 - Preparação dos cascalhos	68
Figura 3.5 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos via peneiramento	74
Figura 3.6 – Curva de distribuição granulométrica obtida via difração à laser da fração passante na peneira #100 do CAP I e CAP III.....	75
Figura 3.7 - Distribuição granulométrica agregado graúdo	76
Figura 3.8 – Concreto fresco	77
Figura 4.1- Análise por MEV/EDS CAP I	84
Figura 4.2 - Análise por MEV/EDS CAP III	85
Figura 4.3 – Espectro no InfraVermelho do CAP I.....	86
Figura 4.4 - Imagem do CAP I, moído. Sem aumento.	87
Figura 4.5 - Microscopia Ótica CAP I - Ampliação 30x	87
Figura 4.6 – MEV(elétrons secundários) CAP I –	87
Figura 4.7- Imagem do cascalho III, moído.....	88
Figura 4.8 – MEV(elétrons secundários) CAP III	88

Figura 4.9 - Difratoograma do CAP I	89
Figura 4.10– Difratoograma do CAP III.....	90
Figura 4.11 – Análise termogravimétrica do CAP I	90
Figura 4.12– Calorimetria diferencial exploratória do CAP I	90
Figura 4.13 – Grão anguloso – esfericidade baixa	91
Figura 4.14 - Grão arredondado – esfericidade alta	92
Figura 4.15 – Imagem do CAP I	93
Figura 4.16 – Análise de imagem do CAP I.....	93
Figura 4.17 – Resistência à compressão axial – Concretos com substituição de CAP I ...	96
Figura 4.18 – Efeito do percentual de substituição e a idade sobre a resistência à compressão – CAP I.....	97
Figura 4.19 – Efeito da interação entre os fatores idade e o percentual de substituição sobre a resistência à compressão	98
Figura 4.20 – Efeito do percentual de substituição de CAP I sobre a resistência à tração por compressão diametral	99
Figura 4.21– Efeito do percentual de substituição do CAP I sobre o módulo de elasticidade	101
Figura 4.22 – Efeito do percentual de substituição do CAP I sobre a absorção de água	102
Figura 4.23 - Micrografias dos concretos com CAP I em diferentes idades	103
Figura 4.24 – Difratoograma de raios X – Concreto S100	106
Figura 4.25 – Detecção de cloretos método colorimétrico – Concreto referência.....	106
Figura 4.26 - Detecção de Cloretos – método colorimétrico.....	107
Figura 4.27 – Resistência à compressão axial – Concretos com adição de CAP III.....	110
Figura 4.28 – Efeito do percentual de adição e a idade sobre a resistência à compressão – CAP III	112
Figura 4.29 – Efeito do percentual da interação entre o percentual de adição e a idade sobre a resistência à compressão	112

Figura 4.30 – Efeito da adição de CAP III sobre a resistência à tração por compressão diametral – CAP III.....	113
Figura 4.31 – Efeito do percentual de adição do CAP III sobre o módulo de elasticidade	115
Figura 4.32 – Efeito do percentual de adição do CAP III sobre a absorção de água.....	116
Figura 4.33 – Micrografias dos concretos com adição do CAP III em diferentes idades .	117
Figura 4.34 – Difratoograma de raios X – Concreto A 15	119

Lista de Quadros

Quadro 2.1 - Equipamentos de controle de sólidos e suas funções	38
Quadro 2.2 - Estudos realizados para uso dos cascalhos de perfuração	53

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Volume médio de cascalho gerado de algumas regiões.	44
Tabela 2.2 – Composição química de cascalhos de perfuração.....	46
Tabela 2.3 – Metais Pesados em cascalhos de perfuração.....	47
Tabela 2.4 – Concentrações obtidas nos ensaios de lixiviação.....	48
Tabela 2.5 – Distribuição granulométrica de cascalhos de perfuração.....	49
Tabela 2.6 – Composição mineralógica de cascalhos de perfuração.....	51
Tabela 3.1 - Variáveis resposta	63
Tabela 3.2 - Níveis dos fatores controláveis para cascalho I.....	64
Tabela 3.3 – Níveis dos fatores controláveis para cascalho III	64
Tabela 3.4 - Matriz experimental	65
Tabela 3.5 - Caracterização do cimento CP V ARI.....	72
Tabela 3.6 - Caracterização da areia G, areia F CAP I e CAP III	73
Tabela 3.7 – Caracterização do agregado graúdo.....	75
Tabela 3.8 - Dosagem dos materiais em massa (materiais secos)	76
Tabela 3.9 - Dosagem dos materiais em massa (materiais secos)	77
Tabela 4.1 – Valores de pH	83
Tabela 4.2 – Composição química quantitativa	83
Tabela 4.3 - Limites de Atterberg do CAP III	91
Tabela 4.4 – Caracterização dos grãos	92
Tabela 4.5 - Resultados da figura 4.16.....	94
Tabela 4.6 - Estado fresco, CAP I	94
Tabela 4.7 – Resistência à compressão axial – CAP I	96
Tabela 4.8 - Análise de variância da resistência à compressão com o percentual de substituição do CAP I, idade e interação	96
Tabela 4.9 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral com o percentual de substituição do CAP I.....	99

Tabela 4.10 - Análise de variância do módulo de elasticidade com o percentual de substituição do CAP I.....	100
Tabela 4.11 - Análise de variância da absorção de água com o percentual de substituição do CAP I	101
Tabela 4.12 - Estado fresco - CAP III	108
Tabela 4.13 – Tempo de pega – CAP III.....	109
Tabela 4.14 – Resistência à compressão axial – CAP III	109
Tabela 4.15 - Análise de variância da resistência à compressão com o percentual de adição do CAP III, idade e interação.	111
Tabela 4.16 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral com o percentual de adição do CAP III	113
Tabela 4.17 - Análise de variância do módulo de elasticidade com o percentual de adição do CAP III	114
Tabela 4.18 – Análise de variância da absorção de água com o percentual de adição do CAP III	116

Lista de abreviaturas e siglas

Areia G – Areia grossa

Areia F – Areia fina

ANOVA – Análise de variância

ANP- Agência Nacional do Petróleo

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

A5 – Concreto com adição de 5% de cascalho da terceira fase

A10 – Concreto com adição de 10% de cascalho da terceira fase

A15 – Concreto com adição de 15% de cascalho da terceira fase

CAP I – Cascalho de perfuração da primeira fase da perfuração

CAP III - Cascalho de perfuração da terceira fase da perfuração

CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

CR – Concreto referência

CSH – Silicato de cálcio hidratado

CV – Coeficiente de variação

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio

DQO – Demanda química de oxigênio

DRX – Difração de raios X

DSC – Calorimetria diferencial exploratória

DTG – Derivada primeira da curva termogravimétrica

EDS – Energia dispersiva de raios X

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ES – Espírito Santo

Fcal – Valor calculado de Fischer

FPSO – *Floating Production Solution*

FRX – Fluorescência de raios X

Ftab – Valor tabelado de Fischer

GL – Graus de liberdade

ICDD – International Centre for Diffraction Data

IEMA – Instituto Estadual de meio ambiente e recursos hídricos

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

IV – Infra vermelho

JCPDS – Joint Committee for Power Diffraction Standards

LACAR – Laboratório de Caracterização Ambiental

LEMAC – Laboratório de ensaios em materiais de construção

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MET – Microscopia eletrônica de transmissão

M.Q. – Média quadrática

M.O. – Microscopia ótica

MPa – Mega Pascal

NAFs – *Non-Aqueous Fluids*. Fluidos de base não aquosa

pH – Potencial hidrogeniônico

P.F. – Perda ao fogo

SE – Elétrons secundários

S.Q. – Soma quadrática

S20 – Concreto com substituição de 20% de areia fina

S50 – Concreto com substituição de 50% de areia fina

S100 – Concreto com substituição de 100% de areia fina

TG – Termogravimetria

UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

NOTAÇÕES QUÍMICAS

Ag^+ - Íon prata

AgCl – Cloreto de prata

Ag_2O – Óxido de prata

AgOH – Hidróxido de prata

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

$\text{Al}(\text{OH})_3$ – Hidróxido de alumínio

AgNO_3 – Nitrato de prata

Ag_2SO_4 – Sulfato de prata

Ca^{2+} - Íon cálcio

Cl^- - Íon cloreto

C_3A – Aluminato tricálcico

C_3S – Silicato tricálcico

CaO – Óxido de cálcio

Fe_2O_3 – Óxido de ferro III

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ – Hidróxido de ferro III

K^+ - Íon potássio

K_2O – Óxido de potássio

MgO – Óxido de magnésio

OH^- - Hidroxila

Na^+ - Íon sódio

NaCl – Cloreto de sódio

SO_4^{2-} - Íons sulfato

SiO_2 – Óxido de silício

SO_3 - Anidrido sulfúrico

SrO – Óxido de estrôncio

TiO_2 – Óxido de titânio

SUMÁRIO

1. Introdução.....	25
1.1 Justificativas	26
1.2 Objetivo Geral.....	27
1.3 Objetivos específicos.....	27
1.4 Estrutura da pesquisa.....	27
2. Revisão Bibliográfica	30
2.1 Petróleo	30
2.1.2 Histórico do petróleo	30
2.1.2 O Petróleo no Brasil.....	32
2.1.3 O Petróleo no Espírito Santo.....	32
2.2 O processo de exploração de petróleo e gás	33
2.2.1 Etapa da prospecção	33
2.2.2 Etapa da perfuração.....	34
2.2.3 Fases de Perfuração.....	35
2.2.4 Resíduos gerados na perfuração	35
2.2.5 Tratamento primário – Controle de sólidos	36
2.2.6 Métodos de tratamentos secundários	38
2.3 Fluido de perfuração.....	39
2.3.1 Tipos de bases dos fluidos.....	40
2.3.2 Comparação entre os tipos de fluidos.....	43
2.4 Cascalhos de perfuração.....	43
2.4.1 Geração dos cascalhos de perfuração.....	44
2.4.2 Contaminantes.....	45
2.4.3 Propriedades Químicas, Ambientais, Físicas e Mineralógicas dos cascalhos de perfuração.	46

2.4.4	Tratamentos e Destinação Final dos Cascalhos	51
2.5	Estudos de aproveitamento dos cascalhos em materiais de construção civil.....	52
2.5.1	Área deste estudo	57
3	Materiais e métodos	62
3.1	Planejamento dos experimentos.....	62
3.1.1	Variáveis resposta.....	63
3.1.2	Fatores controláveis.....	63
3.1.3	Fatores constantes.....	64
3.1.4	Definição dos níveis dos fatores controláveis	64
3.1.5	Definição do modelo estatístico	64
3.1.6	Matriz experimental e organograma da pesquisa	65
3.2	Metodologia de caracterização dos cascalhos de perfuração	68
3.3	Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos	71
3.3.1	Cimento.....	71
3.3.2	Agregado miúdo.....	72
3.3.3	Agregado graúdo	75
3.4	Procedimentos Experimentais	76
3.4.1	Dosagem do concreto	76
3.4.2	Produção dos Concretos.....	77
3.4.3	Ensaio no estado endurecido.....	78
3.4.4	Análise estatística	80
4	Apresentação e discussão dos resultados	82
4.1	Caracterização dos cascalhos	82
4.1.1	Caracterização química	82
4.1.2	Caracterização física e mineralógica	86

4.2	Concretos com substituição do cascalho de perfuração da primeira fase – CAP I	94
4.2.1	Estado fresco	94
4.2.2	Estado endurecido	95
4.2.3	Durabilidade	101
4.2.4	Propriedades Microestruturais	102
4.2.5	Detecção de cloretos	106
4.3	Concretos com adição do cascalho da terceira fase – CAP III	107
4.3.1	Estado fresco	108
4.3.2	Estado endurecido	109
4.3.3	Durabilidade	115
4.3.4	Propriedades Microestruturais	116
4.3.5	Detecção de Cloretos – método colorimétrico.....	119
4.3.6	Classificação ambiental	121
5	Conclusões.....	125
5.1	Quanto à caracterização dos cascalhos da fase I – CAP I	125
5.2	Quanto à caracterização dos cascalhos da fase III – CAP III	126
5.3	Quanto aos concretos.....	126
5.3.1	Concretos com substituição de CAP I.....	126
5.3.2	Concretos com adição de CAP III	127
5.3.3	Conclusões gerais.....	128
5.4	Sugestões para pesquisas futuras.....	128
	Referências.....	130
A.	Referências Bibliográficas	130
B.	Bibliografia referente a normas e procedimentos nacionais e internacionais	136
	APÊNDICE A - Resultados individuais dos ensaios realizados com os cascalhos.....	140

APÊNDICE B - Resultados individuais dos ensaios realizados com os concretos	144
ANEXOS.....	190

Capítulo 1

Nunca nada grandioso no mundo foi feito sem uma grande dose de paixão.

Georg Wilhelm Friedrich Hegel.

1. INTRODUÇÃO

O petróleo é a maior fonte de energia e de matérias primas do planeta e encontra-se na natureza ocupando os vazios de uma rocha porosa chamada rocha reservatório. A perfuração de poços de petróleo gera diversos resíduos entre os quais estão os fluidos e os cascalhos de perfuração.

Cascalhos de perfuração são misturas de pequenos fragmentos de rochas impregnados com o fluido usado para lubrificar e resfriar a broca durante a perfuração.

A administração desses resíduos tem sido um problema para a indústria de petróleo e gás por causa da quantidade gerada e seus contaminantes, que podem ser orgânicos e inorgânicos. O volume médio gerado em perfurações *onshore*¹, no Espírito Santo é de 13m³ para cada 100 m de avanço da perfuração de acordo com a Petrobras (2010). Em 2010 foram geradas 13 x 10³ m³ de cascalho no norte do Estado do Espírito Santo (PETROBRAS, 2010).

A perfuração é dividida em fases, geralmente duas a três, de acordo com a profundidade. Em cada uma delas, o diâmetro do poço vai diminuindo e gerando um menor volume de resíduos, por metro perfurado, e com diferentes contaminantes.

Os contaminantes presentes nos cascalhos dependem da composição química utilizada no fluido de perfuração e da composição da formação rochosa. Nesses contaminantes incluem-se hidrocarbonetos, metais pesados e cloretos.

¹ *Onshore* - Em terra.

Os fluidos de perfuração são classificados pelo tipo de fase líquida, assim, de uma forma geral temos fluido base água ou fluido base óleo. Os fluidos sintéticos são também de base óleo. Há também os fluidos de perfuração de base aerada.

As perfurações *onshore* no estado do Espírito Santo, por determinação do órgão ambiental, utilizam apenas fluido base água, gerando maior volume de cascalhos se comparado a utilização dos fluidos base óleo. Isso devido ao maior inchamento das formações argilosas quando perfuradas com fluido base água.

Os estudos para o reuso do cascalho em materiais de construção são recentes. Eles apontam alternativas para a construção de sub-base de pavimentação, materiais cerâmicos e concretos. A técnica de solidificação e estabilização, chamada no Brasil de encapsulamento, é citada por diversos autores como uma boa alternativa para resíduos inorgânicos, não inertes e perigosos. Essa técnica possui vantagens tais como consumo mínimo de energia e pouca emissão de gases. Entretanto, em alguns trabalhos com cascalhos de perfuração de Al-Ansary, Al-Tabbaa (2004, 2007); Leonard; Stegemann (2010) são apontadas limitações e desvantagens. O principal problema apontado é a alta concentração de componentes orgânicos, cloretos e bentonita que dificulta o processo de hidratação do cimento e pode diminuir a resistência à compressão do concreto. Além disso, a alta concentração de cloretos impede a utilização em estruturas de concreto armado, pois pode provocar a corrosão das armaduras.

Neste estudo foram avaliadas as propriedades dos concretos produzidos com substituição parcial da areia por cascalhos de perfuração e a adição dos cascalhos em relação à massa de cimento. Devido à variedade da composição dos cascalhos foi necessário realizar ensaios mais exaustivos para sua caracterização.

A importância do presente estudo se dá pela ideia de que a utilização dos resíduos da perfuração em materiais de construção não é apenas uma nova ou rentável saída para reutilização desses, mas também uma ótima redução do impacto dos resíduos gerados durante o processo.

1.1 Justificativas

- a) A perfuração de poços de petróleo e gás gera anualmente milhões de toneladas de resíduos que por sua natureza deletéria precisam ser adequadamente gerenciados;
- b) O setor gerador vem registrando crescimento franco e contínuo, o que significa maior geração de resíduos e maiores impactos ambientais;

- c) As práticas ambientais corretas, espelhadas na legislação ambiental, exigem que as gestões dos resíduos tenham como metas não somente a redução na geração, mas também o seu reaproveitamento, ao invés de descarte no meio físico;
- d) As empresas geradoras procuradas manifestaram interesse em colaborar com o estudo. Foi cedido o resíduo, oferecida uma visita à sonda de perfuração e suporte técnico para a elaboração de um projeto de investigação das possibilidades de uso do cascalho como materiais de construção.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi verificar o potencial de aplicação de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás *onshore* do norte do Estado do Espírito Santo na produção de concreto não armado.

1.3 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral foram desdobrados os seguintes objetivos específicos, detalhados a seguir.

- a) Estudar o processo de geração do cascalho, seus tratamentos e disposições finais;
- b) Caracterizar as matérias-primas para confecção dos concretos, em especial o cascalho de perfuração;
- c) Avaliar as propriedades tecnológicas dos concretos formulados, comparando as propriedades de amostras com e sem substituição e adição de cascalhos;

1.4 Estrutura da pesquisa

A dissertação foi subdividida em cinco capítulos. Na introdução, Capítulo 1, foram abordados os resíduos gerados na perfuração dos poços de petróleo e sua problemática, a justificativa deste trabalho, e seu objetivo, assim como a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta um breve histórico sobre o petróleo, uma revisão bibliográfica sobre o processo de exploração de petróleo e gás, os principais resíduos gerados e os estudos para possíveis aplicações do cascalho proveniente da perfuração em materiais de construção civil.

O Capítulo 3 explica a metodologia do trabalho experimental com as técnicas para a caracterização dos cascalhos de perfuração e ensaios tecnológicos nos concretos.

No Capítulo 4 são apresentados, analisados estatisticamente e discutidos os resultados.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências que auxiliaram na elaboração deste estudo, e também apresentados os apêndices e anexos pertinentes a esta dissertação.

Capítulo 2

A experiência é uma lanterna dependurada nas costas que apenas ilumina o caminho já percorrido.

Confúcio

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente é fornecido um arcabouço teórico com elementos para entender a problemática, apresentando um breve histórico do petróleo, o processo de exploração, os fluidos e os cascalhos de perfuração. Em especial é apresentado o estado da arte com os estudos de reaproveitamento dos cascalhos de perfuração em materiais de construção civil.

2.1 Petróleo

Do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), o petróleo no estado líquido é uma substância oleosa inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho-claro (THOMAS, 2001).

O petróleo encontra-se na natureza ocupando os vazios de uma rocha porosa chamada rocha reservatório. Considerando a origem orgânica, o petróleo é um combustível fóssil, originado provavelmente de restos de vida aquática animal acumulados no fundo de oceanos primitivos e cobertos por sedimentos. O tempo e a pressão do sedimento sobre o material depositado no fundo do mar transformaram-no em massas homogêneas viscosas de coloração negra, denominadas jazidas de petróleo.

2.1.2 Histórico do petróleo

Os registros da história da utilização do petróleo remontam a tempos bíblicos. Os povos da Mesopotâmia, do Egito, da Pérsia e da Judéia já utilizavam o betume para pavimentação de estradas, calafetação de grandes construções, aquecimento e iluminação de casas, lubrificação entre outros.

A moderna indústria petrolífera data de meados do século XIX. Até o final do século XIX, os Estados Unidos dominaram praticamente sozinhos o comércio mundial de petróleo, devido em grande parte à atuação do empresário John D. Rockefeller. A supremacia americana só era ameaçada, nas últimas décadas do século XIX, pela produção de óleo nas jazidas do Cáucaso, exploradas pelo grupo Nobel, com capital russo e sueco. Em 1901 uma área de poucos quilômetros quadrados na península de Apsheron, junto ao mar Cáspio, produziu 11,7 milhões de toneladas, no mesmo ano em que os Estados Unidos registravam uma produção de 9,5 milhões de toneladas. O resto do mundo produziu, ao todo, 1,7 milhões de toneladas.

As companhias européias realizaram intensas pesquisas em todo o Oriente Médio, e a comprovação de que a região dispunha de cerca de setenta por cento das reservas mundiais provocou reviravolta em todos os planos de exploração.

O petróleo tem forte presença na sociedade de consumo do mundo atual, conforme mostra a grande quantidade de produtos industrializados que contêm insumos ou são produzidos diretamente a partir dessa matéria-prima e seus derivados.

A primeira guerra mundial pôs em evidência a importância estratégica do petróleo. A transformação do petróleo em material de guerra e o uso generalizado de seus derivados – era a época em que a indústria automobilística começava a ganhar corpo – fizeram com que o controle do suprimento se tornasse questão de interesse nacional. O governo americano passou a incentivar empresas do país a operarem no exterior.

Comercialmente, existem dois tipos de petróleo: o leve (com maior proporção de gasolina) e o pesado (com maior proporção de querosene e óleos combustíveis). O petróleo leve tem maior cotação no mercado mundial, por causa do elevado consumo de gasolina.

Os maiores produtores de petróleo são: Rússia, Arábia Saudita, Estados Unidos, Irã, China, Canadá, México, Emirados Árabes Unidos, Iraque, Kuwait, Venezuela, Noruega, segundo o Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2010). O Brasil está em 14º lugar.

O mundo se tornou dependente do petróleo e o Brasil, depois da crise de 1973, passou a investir na prospecção de jazidas petrolíferas a fim de diminuir nossa dependência externa em relação a esta fonte importantíssima de matéria – prima.

2.1.2 O Petróleo no Brasil

A história do petróleo no Brasil começa em 1858, mas o primeiro campo comercial só foi descoberto em 1941 em Candeias, BA. A partir de 1953, no governo Vargas, foi instituído o monopólio estatal do petróleo com a criação da Petrobras, que deu partida decisiva nas pesquisas do petróleo brasileiro.

A produção petrolífera do Brasil se dá nos estados de Alagoas, Amazonas, Ceará, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Norte. Sendo que desses estados há produção somente no mar em São Paulo, Paraná e Rio de Janeiro (ANP, 2010).

A produção de petróleo no Brasil cresceu de 750 m³/dia na época da criação da Petrobras para mais de dois milhões de barris/dia em 2009, graças aos contínuos avanços tecnológicos de perfuração e produção em terra e principalmente no mar (ANP, 2010).

2.1.3 O Petróleo no Espírito Santo

Atualmente, o Estado do Espírito Santo é o segundo maior produtor de petróleo do Brasil, com 300 mil barris² diários e reservas totais de 2,5 bilhões de barris. Até o final de 2015, poderá atingir a marca de 500 mil barris/dia. Os campos petrolíferos se localizam tanto em terra quanto em mar, em águas rasas, profundas e ultra profundas, contendo óleo leve e pesado e gás não associado (PETROBRAS, 2012).

Dentre os destaques da produção está o campo de Golfinho (26.000 bbl/dia³), localizado no norte do Espírito Santo, com reserva de 450 milhões de barris de óleo leve, considerado o mais nobre. O primeiro módulo de produção da área já está em operação, com o FPSO (*Floating Production Solution*) Capixaba, e o segundo teve a operação iniciada em 2009, com o FPSO Cidade de Vitória.

Há ainda os campos de Jubarte, Cachalote, Baleia Franca, Baleia Azul, Baleia Anã, Caxaréu, Mangangá e Pirambu, que fazem parte do denominado Parque das Baleias, no Sul do Estado, que somam uma reserva de 1,5 bilhões de barris.

Atualmente, o campo de Jubarte é o principal (170.000 bbl/dia) e está na sua primeira fase de produção, por meio da plataforma P-34, que foi reformada no Porto de Vitória. Já

² A unidade barril é utilizada para expressar a quantidade de petróleo, correspondendo cada barril a 159 litros de óleo cru.

³ bbl/dia – Barris por dia.

as outras áreas deverão começar a produzir no início da próxima década, segundo expectativa da Petrobras.

Os resultados obtidos pela produção terrestre na última década têm se mantido constantes, ao contrário do que era de se esperar de uma área madura com alto grau de exploração. Para isso, foram desenvolvidas novas tecnologias para aumentar a vida útil desses campos.

No Brasil a produção terrestre está concentrada, principalmente, nas regiões norte e nordeste e, em menor escala, no Sudeste, na área do Espírito Santo. A produção média dos campos terrestres do país é de 210 mil barris por dia de óleo e 17,9 milhões de m³ de gás (PETROBRAS, 2012).

O Espírito Santo é hoje responsável por 40% das notificações de petróleo e gás natural, conforme levantamento da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) desde sua criação, em janeiro de 1998.

A estatal petrolífera está implantando projetos de desenvolvimento da produção do campo de Fazenda Alegre, no norte capixaba, que atualmente é responsável por 60% da extração de óleo em terra. Em novembro de 2005, a Petrobras declarou a comercialidade do campo de Inhambu, contendo óleo pesado, no município de Jaguaré.

Outros investimentos no setor acontecem na produção dos campos marítimos de Peroá e Cangóia e na ampliação da rede de gasodutos, com a construção do denominado Gasoduto Sudeste Nordeste (Gasene), que ligará a malha do Sudeste e Nordeste brasileiro, passando pelo Espírito Santo. O projeto — constituído pelos trechos Cabiúnas-Vitória, Vitória-Cacimbas e Cacimbas-Catu — permitirá o escoamento de 20 milhões de metros cúbicos de gás por dia.

2.2 O processo de exploração de petróleo e gás

Os principais produtos gerados da perfuração de poços de petróleo e gás são: hidrocarbonetos (petróleo) e gases. O processo de exploração de petróleo e gás (*upstream*) compreendem as etapas da prospecção e perfuração.

2.2.1 Etapa da prospecção

Na etapa da prospecção são realizados estudos e análises de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares, que consiste na primeira fase da busca por petróleo, que apontam as regiões de alta probabilidade de ocorrência de hidrocarbonetos através de métodos geológicos, potenciais ou sísmicos, visando pesquisar entre as formações do

subsolo aquelas com potencial para armazenar petróleo. Em seguida ocorrem as etapas de perfuração e avaliação de formações que confirmam ou não a existência de petróleo. Havendo sucesso, inicia-se a terceira etapa que consiste no desenvolvimento do poço.

2.2.2 Etapa da perfuração

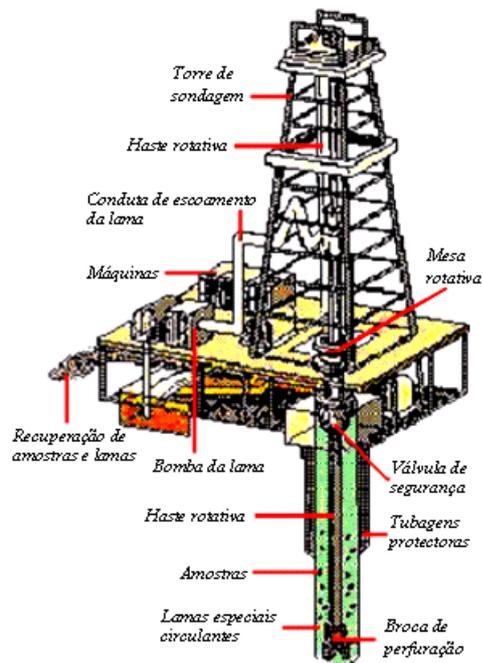
A perfuração de um poço de petróleo é realizada através de uma sonda de perfuração, uma grande estrutura que contém diversos equipamentos responsáveis pela construção do poço (Figura 2.1 e Figura 2.2).

Figura 2.1 – Sonda de perfuração



Fonte: Cortesia Petrobras (2010).

Figura 2.2 – Esquema simplificado de uma sonda



Fonte: Amaral (2012).

Na perfuração rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração.

Os fragmentos da rocha são removidos continuamente através de um fluido de perfuração ou lama. O fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*, e retorna à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna.

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e inicia-se a descida de tubos de revestimento. O anular entre os tubos do revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar as rochas atravessadas pela broca, permitindo então o avanço da perfuração com segurança.

Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca de diâmetro menor do que o diâmetro interno do revestimento para o prosseguimento da perfuração.

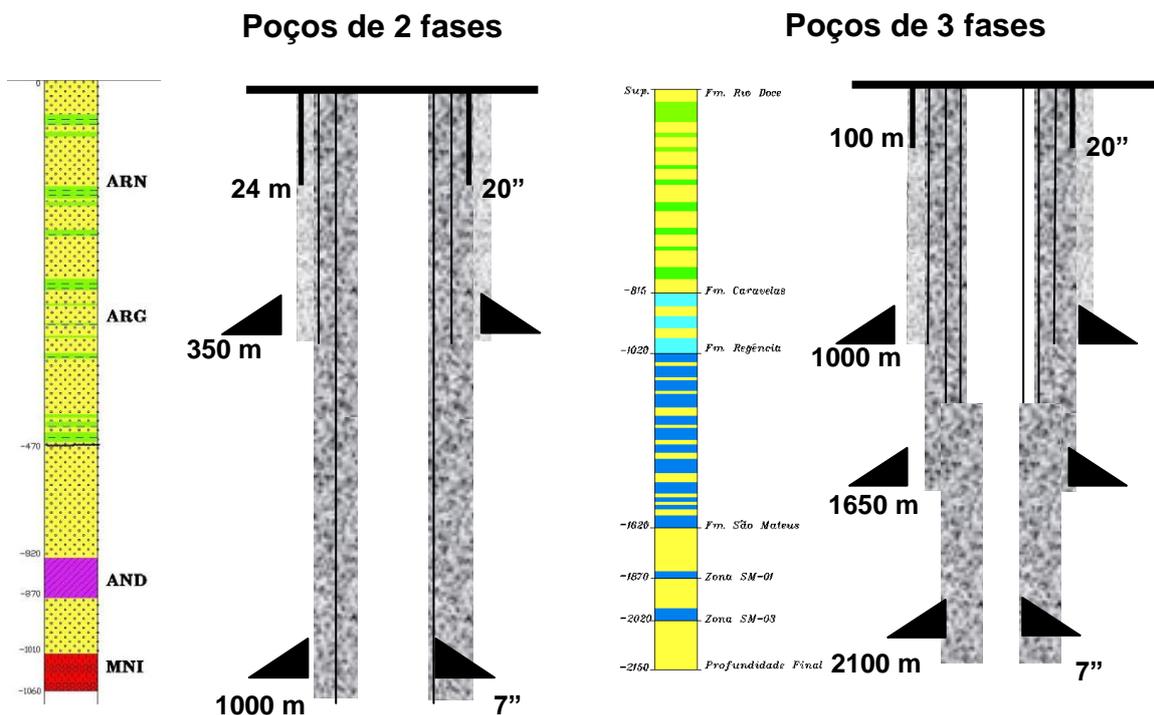
Do exposto, percebe-se que o poço é perfurado em diversas fases, caracterizado pelos diferentes diâmetros das brocas.

2.2.3 Fases de Perfuração

A profundidade e tipo de formação geológica dividem a perfuração em fases. Os poços perfurados no norte do Espírito Santo possuem geralmente duas (Figura 2.3) ou três fases (Figura 2.4). Durante a primeira fase são gerados os maiores volumes de cascalhos e com menor quantidade de contaminantes provenientes do fluido, já que o mesmo na primeira fase é composto de um fluido argiloso sem sal. Diferente das demais em que são usados os fluidos poliméricos salgados e a poços direcionais, onde são adicionados lubrificantes ao fluido. Maiores detalhes sobre os fluidos estão no item 2.3.

Figura 2.3 – Esquema de um poço de 2 fases

Figura 2.4 – Esquema de um poço de 3 fases



Fonte: PETROBRAS (2010).

Fonte: PETROBRAS (2010).

2.2.4 Resíduos gerados na perfuração

O cascalho e o fluido de perfuração são os resíduos característicos gerados pelas atividades de perfuração de poços de óleo e gás (WBG, 2007).

Há também demais resíduos que fazem parte da operação de perfuração, como:

- a) Águas e areias oleosas;
- b) Cimento e seus aditivos utilizados durante as operações de perfuração;
- c) Embalagens de produtos químicos;
- d) Combustíveis, lubrificantes e outros óleos;
- e) Fluidos provenientes das formações, como soluções salinas, óleo cru ou outros fluidos presentes nas formações perfuradas;
- f) Emissões atmosféricas;
- g) Geração de barulho;
- h) Outros resíduos gerados usualmente por humanos (BROWNING; SEATON, 2005).

A inevitável polêmica em torno da utilização e descarte desses rejeitos tem colocado em posição de destaque no debate internacional a proteção ambiental na etapa da exploração de óleo e gás (AL-ANSARY; AL-TABBAA, 2007).

Neste estudo será abordada a problemática da geração e destinação dos cascalhos de perfuração gerados em terra (*onshore*). O tópico 2.2.5 explicará o tratamento primário, ao qual os cascalhos são submetidos ao saírem do poço.

2.2.5 Tratamento primário – Controle de sólidos

Os fragmentos das rochas que foram removidos com o auxílio do fluido de perfuração retornam à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna.

O fluido de perfuração para ser reaproveitado na perfuração deve passar por um separador de sólidos. Estes equipamentos em conjunto são capazes de reter até 99% dos fragmentos das rochas cortados pela broca contidos no fluido, denominados cascalhos de perfuração.

Perfazendo um circuito típico de controle dos sólidos, o fluido de perfuração ao sair do poço entra na peneira vibratória (Figura 2.5 a) onde são parcialmente separados do fluido os sólidos de granulometria maior e são descartados geralmente em uma caçamba de 5 m³. O fluido que passa pelas telas das peneiras é processado por um conjunto de dois a quatro hidrociclones de 8 a 20 polegadas. A função de um hidrociclone é acelerar o processo natural de decantação de partículas de um fluido, no caso basicamente a areia, o que os torna conhecidos como desareidores onde existe outra caçamba para receber o resíduo (Figura 2.5 b). Saindo deste equipamento a lama passa ao dessiltador. Este nome vem do inglês *silt*, que caracteriza uma partícula de tamanho maior que a argila e menor que a areia, denominada silte. O dessiltador é um hidrociclone de 4 a 5 polegadas (dependendo da vazão de fluido a ser processada pode haver de oito a doze dessiltadores), que irá descartar as partículas sílticas em uma terceira caçamba. Saindo do dessiltador o fluido pode ser direcionado a um *mud cleaner*, que trata-se de um

dessiltador com uma peneira para recuperar partículas que não foram retidas nos equipamentos anteriores. Dependendo do caso, pode haver também uma centrífuga para retirar as partículas menores que ainda não tenham sido descartadas pelos hidrociclones. A partir daí, a lama volta a ser bombeada para o poço. Há também os desgaseificadores, com a função de eliminar o gás do fluido de perfuração (THOMAS, 2001).

Figura 2.5 – Sistema de controle de sólidos



Nota: a) Fluido com cascalho nas peneiras vibratória; b) Saída das peneiras c) Transporte do cascalho para o aterro.

Fonte: Cortesia da Petrobras (2010).

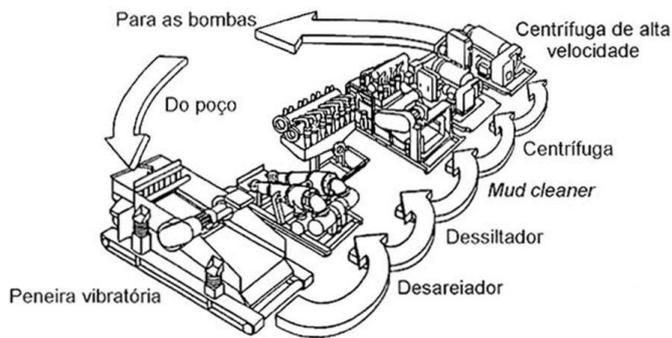
Dentre os equipamentos citados, a centrífuga é o que apresenta maior eficiência na separação sólido-líquido, portanto, o resíduo descartado pela centrífuga apresenta menor umidade e contaminação que os descartado nos demais equipamentos. Por outro lado, a vazão de processamento é bem maior (< 50%) que os demais equipamentos. Assim, nem todo o fluido retorna do poço poderá ser processado pela centrífuga.

No norte do Espírito Santo, os cascalhos, após passarem pelo tratamento primário, são enviados para o descarte final em aterros controlados. O conteúdo das três caçambas (peneiras, desareidores e dessiltador) é misturado e transportado em caminhões basculantes de 20 m³ (Figura 2.5 c).

Ressalta-se que esses são os equipamentos tradicionais utilizados no controle dos sólidos, que se agregam ao fluido de perfuração, porém nem sempre serão todos utilizados.

Com base no exposto, o Quadro 2.1 relaciona cada equipamento de controle de sólidos à sua função. A Figura 2.6 mostra um sistema típico de controle de sólidos, composto por peneira vibratória, desareizador, dessiltador, *mud cleaner* e centrífugas.

Figura 2.6 - Sistema típico de separador de sólidos



Fonte: Thomas (2001, p.66).

Quadro 2.1 - Equipamentos de controle de sólidos e suas funções

Equipamentos de tratamento	O que retira da lama
Peneira Vibratória	Sólidos grosseiros
Desareizador	Areia
Dessiltador	Silte
Mud Cleaner	Partículas reaproveitáveis das dimensões do silte
Centrífuga	Partículas que escaparam dos hidrociclones
Desgaseificador	Gases

Fonte: Adaptado de Thomas (2001)

2.2.6 Métodos de tratamentos secundários

Após passar pelo tratamento primário os cascalhos de perfuração podem necessitar de outras técnicas para seu completo tratamento.

As técnicas disponíveis para o tratamento e a disposição dos cascalhos são escolhidas de acordo com a contaminação do cascalho, legislação local e decisão da empresa geradora. Mas existem tratamentos secundários para redução dos contaminantes ou inertização. Esses tratamentos podem ser químicos, físico-químicos ou biológicos; entre os quais podemos citar: incineração, reinjeção, co-processamento na indústria do cimento, incineração, dessorção térmica ou microondas, biorremediação e fitorremediação e o descarte em aterros.

Chen *et al.* (2007) explicam alguns métodos de tratamento secundário:

- Métodos de inertização (estabilização, solidificação e encapsulamento): mistura de cascalhos com cimento ou cal para prevenir a dissolução de óleo e componentes orgânicos oriundos dos cascalhos;
- Tratamento a quente: para decomposição da matéria orgânica absorvida na superfície do mineral com incineração ou método de dessorção por aquecimento em forno rotativo a 1200-1500°C. Para remover a matéria orgânica com dessorção por aquecimento em 400°C, com tratamento da produção do gás;
- Disposição em aterro: o local do aterro deve estar devidamente licenciado e o resíduo caracterizado antes da disposição;
- Re-injeção: mistura de fragmento de cascalhos, água do mar e polímeros, em seguida, injeção no espaço anelar do poço com alta pressão, ou em formações geológicas adequadas com a técnica de fratura hidráulica;
- Tratamento biológico: para decompor o carbono orgânico com microrganismos; transformar o cascalho oleoso em um resíduo não tóxico, essa técnica é usada geralmente no setor agrícola;
- Recobrimento simplificado e reutilização: o cascalho grosso pode ser simplesmente tratado e testado, se a areia ou partes mais grossas estiverem limpas, eles podem

ser usados na manutenção ou construção das plataformas ou base para rodovias e construções públicas.

Apesar de reduzirem os contaminantes e, em algumas técnicas, recuperarem parte do óleo essas técnicas ainda são consideradas onerosas e sem solução ambiental adequada (PAGE *et al.*, 2003).

2.3 Fluido de perfuração

A utilização de fluidos de perfuração começou em 1901 no poço de *Spindletop* no Texas (BOURGOYNE *et al.*, 1991) e seu desenvolvimento permanece até hoje como um grande desafio para a indústria do petróleo, na busca pelo ponto ótimo entre custo, performance técnica, e a partir da década de 80, o atendimento às exigências ambientais. A eficiência da perfuração de um poço depende em grande parte do casamento entre o fluido de perfuração utilizado com as formações perfuradas.

Os fluidos de perfuração são misturas de sólidos, líquidos, aditivos químicos e/ou gases. Podem assumir o aspecto de suspensões, emulsões ou dispersões coloidais, dependendo do estado físico de seus componentes.

Quando da perfuração dos primeiros poços de petróleo, utilizava-se a própria argila da formação misturada à água, formando uma espécie de lama, motivo do fluido também ser denominado *lama* de perfuração (VEIGA, 1998).

Lama de perfuração é um fluido especial, composto basicamente de uma base aquosa, ou não aquosa, e viscosantes e adensantes (agentes utilizados para conferir peso) injetado no poço a fim de manter a pressão ideal, impedindo que as paredes do poço desmoronem. A lama de perfuração serve, também, para lubrificar e resfriar a broca e deter a subida do gás e do petróleo, em caso de descoberta. Para manter as condições hidrostáticas ideais para a perfuração em cada formação geológica, profundidade e ângulo são utilizados fluidos com diversos aditivos químicos.

São funções dos fluidos de perfuração:

- a) lubrificar e resfriar a broca;
- b) limpar o poço e transportar o cascalho à superfície;
- c) proteger e suportar as paredes do poço;
- d) prevenir a entrada de fluidos da formação para dentro do poço;
- e) trazer à superfície informações a respeito das formações perfuradas;

Os fluidos de perfuração sofrem a inclusão de aditivos com o objetivo de desempenharem as mais diversas funções como: adensantes; viscosificantes; dispersantes; defloculantes;

agentes utilizados no controle da “perda de fluido”; emulsionantes; biocidas; salmouras; lubrificantes; inibidores de corrosão; liberadores de coluna e controladores de pH.

2.3.1 Tipos de bases dos fluidos

Os fluidos de perfuração diferenciam-se quanto à sua base, que pode ser água, óleo ou sintética. Há também os fluidos de perfuração de base aerada. Podem ser utilizados fluidos de perfuração de diferentes bases para cada fase de perfuração de um mesmo poço.

2.3.1.1 Os fluidos de perfuração à base de água

A grande maioria dos fluidos de perfuração utilizados no mundo é formada por líquidos à base de água.

Um fluido de base aquosa é constituído de água e diversos componentes como argilas e colóides orgânicos, que são adicionados para conferir as propriedades viscosas e de filtração necessárias. O fluido à base de água consiste numa mistura de sólidos, líquidos e aditivos químicos, tendo a água como a fase contínua. O líquido base pode ser a água salgada, água doce ou água salgada saturada (salmoura), dependendo da disponibilidade e das necessidades relativas ao fluido de perfuração (ECONOMIDES *et al.*, 1998).

Podem ser adicionados também minerais densos (ex. barita) e sólidos provenientes da formação que acabam por se dispersar no fluido. O fluido também contém sais dissolvidos que podem ser tanto proveniente das formações como adicionados por diversos propósitos. Com esses constituintes é possível obter fluidos com propriedades e custo em uma ampla faixa de acordo com a necessidade do projeto.

Um determinado fluido aquoso pode ter propriedades e constituintes que permitiriam enquadrar em mais de uma classificação.

Os principais tipos de fluidos à base de água são os fluidos convencionais, fluidos naturais, fluidos dispersos tratados com lignosulfonados, fluidos tratados com cal, fluidos tratados com gesso, fluidos não dispersos tratados com cal e polímeros, fluidos salgados tratados com polímeros, fluidos de base cloreto de potássio (KCl), fluidos isentos de sólidos e os fluidos biopoliméricos (VEIGA, 1998).

Os fluidos de perfuração à base de água possuem um baixo custo comparado aos demais e são biodegradáveis. Infelizmente, os fluidos de perfuração à base de água possuem algumas desvantagens. Tal tipo de fluido possui argilas altamente hidrofílicas em sua composição (KHONDAKER, 2000). Também chamadas “sólidos ativos”, estas argilas

reagem quimicamente com a água do fluido de perfuração, provocando um “inchaço” da argila e dispersando partículas pelo fluido e por todo o poço. Este é um grave problema de performance causado pela utilização de lamas à base de água, provocando também instabilidade ao poço e perda de fluido para as formações. Em paralelo, este “inchaço” de material leva a uma geração de volume extra de resíduos de perfuração. A solução para os problemas apontados é “inibir” o fluido através da adição de substâncias químicas que impeçam ou diminuam sua reação com a água. São os denominados “inibidores” como os íons sódio, potássio e cálcio, que reduzem a atividade dos sólidos ativos, minimizando a hidratação e o “inchaço” da argila e folhelhos.

Devido a tais dificuldades, os fluidos de perfuração à base de água não conseguiram acompanhar os novos desafios que foram surgindo com a evolução da tecnologia, como a perfuração direcional ou a grandes profundidades. A utilização dos fluidos à base de água nesses empreendimentos pode tornar a perfuração lenta, custosa ou até mesmo impossível (EPA, 1999), além de gerar uma quantidade maior de resíduos.

2.3.1.2 Os Fluidos de Perfuração à Base de Óleo

Os fluidos de perfuração à base de óleo foram desenvolvidos para situações onde os à base de água apresentavam limitações técnicas e operacionais. As lamas à base de óleo são similares em composição às à base de água, exceto pela fase contínua que passa a ser o óleo. A água está presente na lama à base de óleo sob a forma de uma emulsão.

Introduzidos no mercado na década de 40, os fluidos à base de óleo logo ganharam destaque, apesar de custarem de 2 a 4 vezes mais do que os de base aquosa. Os fluidos à base de óleo são muito utilizados e indicados para a perfuração marítima.

As vantagens de performance na perfuração com lamas à base de óleo em comparação com as de base aquosa são (HALL, 2001; VEIGA, 1998; BLEIER *et al.*, 1992):

- a) compatibilidade com as formações sensíveis à água;
- b) minimização da corrosão;
- c) maior estabilidade térmica e estrutural na perfuração de poços profundos e com altas temperaturas;
- d) melhor lubrificação, facilitando a perfuração de poços direcionais;
- e) reaproveitamento após tratamento adequado; e
- f) em virtude das vantagens acima a perfuração é feita mais rapidamente, proporcionando um aumento das taxas de penetração.

Infelizmente, ao mesmo tempo em que ganham em desempenho, as lamas à base de óleo são prejudiciais ao meio ambiente quando descartadas inadequadamente. A toxicidade é a mais séria e talvez uma desvantagem insuperável das lamas a base de óleo.

A partir do final da década de 80 a pesquisa e desenvolvimento de fluidos de base não aquosa, os chamados NAFs (*Non-Aqueous Fluids*), passaram a adquirir importância crescente e estratégica, em função do rigor crescente da legislação ambiental internacional. Os NAFs compreendem os fluidos à base de óleo, os à base de óleo mineral de baixa toxicidade, à base de óleo mineral melhorado e os de base sintética.

2.3.1.3 Os Fluidos de Perfuração Sintéticos

Os fluidos de perfuração sintéticos foram desenvolvidos como uma alternativa às limitações de performance dos à base de água e em resposta às restrições ambientais impostas aos fluidos à base de óleo. Utilizando como fluido base substâncias químicas sintéticas, os fluidos sintéticos são também chamados “pseudo-lamas à base de óleo”, pois na prática as substituem, oferecendo menor toxicidade e produção de menor volume de resíduos de perfuração. Os sintéticos são muito utilizados em áreas marítimas onde é proibido o descarte de cascalho quando se perfura com lamas à base de óleo. Os fluidos sintéticos são mais caros do que os oleosos, não deixando de serem economicamente compensadores, pois o descarte marítimo dos fluidos de perfuração à base de óleo está proibido em diversas partes do mundo, implicando em custos e riscos extras a serem assumidos com o transporte dos resíduos para descarte em terra.

2.3.1.4 Os Fluidos de Perfuração à Base de Ar

Um poço pode ser perfurado utilizando ar ou gás natural ao invés dos fluidos de perfuração líquidos convencionais. Através destes tipos de fluido o ar ou gás circulam do mesmo modo do que uma lama líquida convencional através de pressão fornecida por compressores que são instalados na superfície junto aos demais equipamentos de perfuração. A perfuração com ar puro utiliza ar comprimido ou nitrogênio. Quando o ar é utilizado, sua combinação com hidrocarbonetos no subterrâneo pode se transformar numa mistura explosiva, exigindo cuidados extras quanto a explosões ou incêndios. Os fluidos de perfuração aerados executam satisfatoriamente suas funções nas operações de perfuração, exceto em relação ao transporte de cascalho (ainda que apresentem a grande vantagem de não contaminar o cascalho) e ao controle de pressões subterrâneas. Por esse motivo, sua aplicação fica limitada a regiões que possuam autorização legal e

existência de formações de baixa permeabilidade, como calcários ou formações com rochas muito duras.

As formas básicas de fluidos utilizados na perfuração a ar são o pó (polvilhado), névoa (neblina) ou espuma. Pode-se também lançar mão da aeração de determinadas lamas convencionais. As lamas aeradas são utilizadas quando há problemas graves de perda de circulação nas formações perfuradas e não há possibilidade de se utilizar outro fluido à base de ar. Para reduzir as taxas de corrosão associadas à utilização das lamas aeradas tem sido utilizado, ao invés do ar, o nitrogênio que é gerado na região da perfuração (ECONOMIDES *et al.*, 1998).

2.3.2 Comparação entre os tipos de fluidos

Os fluidos de base água produzem grande quantidade de cascalho, porém geram grande parte de resíduos não perigosos. Os fluidos de base óleo são os mais perigosos do ponto de vista ambiental em função da presença do óleo diesel, mas ainda são a melhor opção para algumas condições de perfuração.

Os fluidos sintéticos são menos tóxicos, entretanto as dificuldades de biodegradabilidade são as mesmas que os de base óleo.

Para perfuração é necessário obter licenciamento ambiental. Para isso é apresentado ao órgão responsável um estudo de impacto ambiental, no qual são especificados os procedimentos de descarte e controle adotados. Se o órgão ambiental estiver de acordo, a licença é concedida. A ANP (Agência Nacional do Petróleo) e o órgão ambiental realizam auditorias para verificar possíveis inconformidades.

No Brasil não há legislação específica que regule o descarte de resíduos da perfuração de poços de óleo e gás. Em terra cada estado da federação possui regulamentação própria. No estado do Espírito Santo só é permitido o uso de fluidos base água nas perfurações *onshore*.

2.4 Cascalhos de perfuração

Cascalhos de perfuração são misturas de pequenos fragmentos de rochas impregnados com o fluido usado para lubrificar e resfriar a broca durante a perfuração (LEONARD; STEGEMANN, 2010).

No entanto, essa definição pode ser aprofundada com o auxílio de diversos estudos realizados com os cascalhos, principalmente na região do Mar do Norte (DHIR *et al.*, 2010; LEONARD; STEGEMANN, 2010; AL-ANSARY e AL-TABBAA, 2004). Nos itens a

seguir serão abordados a geração dos cascalhos, os seus contaminantes, sua caracterização quanto às propriedades químicas, as ambientais, as físicas e as mineralógicas, os processos de tratamento e a disposição final.

2.4.1 Geração dos cascalhos de perfuração

Os resíduos de perfuração de poços de petróleo, quando dispostos inadequadamente, poluem o solo, deterioram a paisagem urbana e constituem um passivo ambiental, caso sejam destinados a aterros sem tratamento prévio.

A quantidade de resíduos de perfuração de poços de petróleo gera impactos negativos significativos (PAGE, 2003). A administração desses resíduos tem sido um problema para a indústria de petróleo e gás por causa da quantidade gerada e seus contaminantes, que podem ser orgânicos e inorgânicos (LEONARD; STEGEMANN, 2010). Dados do American Petroleum Institute (API, 2000 *apud* PIRES, 2009) revelam que 6×10^9 litros⁴ (~15.600.000 t) por ano são gerados nos Estados Unidos e segundo Al-Ansary e Al-Tabbaa (2004) no Reino Unido esse volume varia de 50.000 a 80.000 toneladas por ano.

Teoricamente o volume de cascalho gerado durante a perfuração de um poço é o volume geométrico do cilindro perfurado (chamado volume nominal do poço). Mas no cálculo do volume de cascalho produzido é dado um coeficiente de segurança em torno de 20% devido a eventuais desabamentos das formações para dentro do poço, normais durante a perfuração. O volume médio gerado em perfurações terrestres é de 13m³ para cada 100 m de avanço da perfuração, dependendo do diâmetro do poço, de acordo com a Petrobras (2010). No primeiro semestre de 2010 foram geradas 10×10^3 toneladas de cascalho nas perfurações *onshore* no norte do Espírito Santo (PETROBRAS, 2010).

Tabela 2.1 - Volume médio de cascalho gerado de algumas regiões.

REGIÃO	VOLUME (T/ANO)	REFERÊNCIA	ANO
Estados Unidos	$15,6 \times 10^5$	American Petroleum Institute (API)	2000
Reino Unido	$5 - 8 \times 10^4$	Al-Ansary e Al-Tabbaa	2004
Bahia-Brasil ⁽¹⁾	8×10^4	Petrobras	2009
Espírito Santo ⁽¹⁾	7×10^3 ⁽²⁾	Petrobras	2008
Espírito Santo ⁽¹⁾	10×10^3 ⁽³⁾	Petrobras	2010

Nota: (1) Gerado em terra; (2) período de 10 meses; (3) período de 6 meses.

⁴ Densidade cascalho = 2,6 kg/dm³

A Tabela 2.1 demonstra o volume médio de cascalho gerado de algumas regiões. Sendo que os valores dos Estados Unidos e Reino Unido são referentes a perfuração marítima (*offshore*) as demais apenas em terra (*onshore*).

2.4.2 Contaminantes

A presença e a concentração dos contaminantes do cascalho dependem do fluido utilizado, da formação geológica perfurada, da fase do poço e da água utilizada na preparação dos fluidos.

Os principais contaminantes podem ser divididos em hidrocarbonetos, sais solúveis em água e em alguns casos metais pesados (REIS, 1996).

2.4.2.1 Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos podem contaminar os cascalhos durante a sua descoberta na forma de óleo cru ou se contidos nos fluidos. Eles são parcialmente removidos através do sistema de controle de sólidos, porém essa remoção não é total.

O óleo cru contém milhares de diferentes tipos de moléculas de hidrocarbonetos. A toxicidade e o potencial de impactos ambientais variam consideravelmente para diferentes moléculas. Um número de bioensaios tem sido realizado para determinar a toxicidade de hidrocarbonetos em animais marinhos. A toxicidade de hidrocarbonetos que tem sido encontrada é bastante variável e generalizações não podem ser feitas facilmente. Fatores que afetam a toxicidade incluem: peso molecular, família do hidrocarboneto, o organismo exposto e seu estágio no ciclo de vida. Para misturas de hidrocarbonetos, como o óleo cru, a toxicidade também depende da história de exposição. Para hidrocarbonetos de mesma família, a toxicidade tende a aumentar com a redução do peso molecular. Pequenas partículas tendem a ser mais tóxicas que as maiores. Os hidrocarbonetos mais tóxicos são os que possuem maior solubilidade em água. A alta solubilidade faz a molécula ser mais acessível para absorção de plantas e animais (REIS, 1996).

As análises térmicas e de composição elementar em conjunto são capazes de detectar a presença e os teores de hidrocarbonetos que podem estar presentes nos cascalhos. Essas técnicas serão abordadas no item 3.2.

2.4.2.2 Sais Solúveis

Sais solúveis, como cloreto de potássio e sódio, fazem parte da composição básica dos fluidos de perfuração de poços de petróleo e gás. E a disposição desses sais no solo,

dissolvidos nos cascalhos da perfuração, podem trazer consequências graves ao meio ambiente.

A concentração excessiva de sal solúvel no solo aumenta o potencial osmótico, que é a causa principal do dano e morte das plantas. O potencial osmótico é a força com que os constituintes dissolvidos tentam reter as moléculas de água, ou seja, o sal no solo compete com as plantas pelas moléculas de água. O excesso de sal no solo faz com que as plantas tenham, prematuramente, stress por secura, mesmo que quantidades substanciais de água estejam disponíveis.

Além disso, a lixiviação desse sal pode vir a transportá-lo até lençóis de água doce subterrâneos, alterando a qualidade dessas águas (REIS, 1996).

2.4.3 Propriedades Químicas, Ambientais, Físicas e Mineralógicas dos cascalhos de perfuração.

2.4.3.1 Propriedades Químicas

Por não haver uma remoção total do fluido impregnado nos cascalhos, estes podem conter contaminantes. Esses contaminantes presentes nos cascalhos dependem da composição química utilizada no fluido de perfuração e da composição da formação rochosa.

Alguns estudos com cascalhos descreveram suas composições químicas, expressas nos óxidos mais estáveis, e os metais pesados detectados nos cascalho *in natura* e estão sintetizados na Tabela 2.2 e Tabela 2.3. Pode-se perceber que essas composições são realmente muito variáveis.

Tabela 2.2 – Composição química de cascalhos de perfuração

Determinações (%)	ABBE <i>et al.</i> (2009)	PIRES (2009)	MEDEIROS (2010)	LEONARD e STEGEMANN (2010)
SiO ₂	47,60	43,96	36,5	60,4
Al ₂ O ₃	13,54	21,48	11,5	10,4
Fe ₂ O ₃	6,34	5,40	4,5	4,9
BaO	11,39	2,38	N.A.	N.A.
CaO	2,78	18,12	35,3	2,5
MnO	0,17	N.A.	0,09	0,06
MgO	2,31	N.A.	N.A.	2,0
K ₂ O	2,33	4,51	2,7	1,7
Na ₂ O	1,17	N.A.	N.A.	2,4
TiO ₂	0,65	N.A.	0,81	0,6
P ₂ O ₅	0,10	N.A.	N.A.	0,1

Nota: N.A.- Não apresentado

Nesses contaminantes incluem-se hidrocarbonetos e metais pesados como arsênio, bário, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, prata e selênio, e altos índices de cloretos, óleos e graxas, elementos que causam demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e elementos que causam alcalinidade.

Tabela 2.3 – Metais Pesados em cascalhos de perfuração

Concentrações de metais pesados	ABBE <i>et al.</i> (2009) – (ppm)	MEDEIROS (2010) (%)	LEONARD e STEGEMANN (2010) (mg/kg)
As	11,8	N.A	5
Cd	0,3	N.A	21
Cr	116,0	N.A	106
Cu	32,9	0,02	44
Ni	65,0	N.A	38
Pb	11,2	N.A	150
Zn	125,0	0,03	82
Ba	N.A	N.A	51.500
V	N.A	N.A	108
Mn	N.A	N.A	345
Sr	N.A	N.A	930

Nota: N.A.- Não apresentado

2.4.3.2 Propriedades Ambientais

A medida mais comum do potencial de impacto ambiental de um material é a sua toxicidade. Toxicidade é definida pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) como a propriedade potencial que o agente tóxico possui de provocar, em maior ou menor grau, um efeito adverso em consequência de sua interação com o organismo. Toxicidade ocorre quando um material causa um efeito deletério sobre um organismo, população ou comunidade. A toxicidade de uma substância é a medida de como ela prejudica a vida e a saúde dos seres vivos após a exposição à substância. Dois tipos de medidas de toxicidade são comumente usados: a dose e a concentração. A dose é a concentração de uma substância que foi absorvida no tecido das espécies em estudo, enquanto a concentração é uma medida da concentração de uma substância no ambiente que as espécies vivem e também incluem um intervalo de tempo de exposição. Bioensaios de toxicidade são realizados em animais e os resultados são extrapolados para criar os guias que contêm os valores máximos permitidos para cada elemento ou substância (REIS, 1996).

No Brasil, a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) contém as tabelas com os limites máximos nos extratos obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização (Tabela 2.4), que são estimadas para o nível de exposição que provavelmente não acarretará efeitos deletérios durante o tempo de vida. Entretanto, esses limites estão baseados nos padrões de potabilidade da água. Susich e Schwenne (2004) discutem sobre esses limites, pois eles

desconsideram a solubilidade desses metais. Existem metais como a galena (sulfeto de chumbo) que contém aproximadamente 87% de chumbo, entretanto a galena é essencialmente insolúvel, resultando em pequenos riscos aos expostos por ela. Eles propõem ainda um aumento para os limites máximos permitidos em cerca de 10 vezes dos limites atuais, o que ainda seria bem menor que os limites considerados de toxicidade dos metais. Uma norma com base na concentração total dos metais para rochas é muito conservador, ou melhor interpretando, irreal.

O principal risco para o meio ambiente associado a metais pesados está em suas formas solúveis em água ou trocáveis (PIRES, 2009). Os seres humanos necessitam apenas de pequenas quantidades de alguns desses metais e excessos podem apresentar efeitos adversos à saúde humana.

Outra crítica também de Susich e Schwenne (2004) é quanto a não consideração da caracterização física dos cascalhos para determinação da disponibilidade dos metais, pois frações menores que 50 mesh (297µm) são consideradas com maior risco porque partículas pequenas têm maior área superficial por unidade de massa e correspondem a um alto potencial de lixiviar metais.

Tabela 2.4 – Concentrações obtidas nos ensaios de lixiviação

Concentrações	SUSICH e SCHWENNE (2004) (mg/l)	BORGES (2006) (mg/l)	Limite máximo obtido no ensaio de lixiviação (mg/l)
As	0,02	<0,001	1,0
Ba	1,48	2,75	70,0
Cd	0,2U	0,00325	0,5
Cr	0,1U	0,00375	5,0
Cu	NI	0,0335	N.A.
Hg	0,20U	<0,0002	0,1
Pb	1,0U	<0,006	1,0
Zn	NI	0,14	N.A.
Pt	0,20U	0,00055	5,0
Se	0,005U	0,006	1,0
Mn	NI	0,375	N.A.
Sódio	NI	580	N.A.
Fluoreto	NI	1,17	150,0

Nota: U- abaixo do limite de detecção; N.A. – não aplicável, NI – não informado.

Por meio dos resultados dos ensaios de lixiviação segundo a norma NBR 10.005 (ABNT, 20004) e dos ensaios de solubilização segundo a norma NBR 10.006 (ABNT, 20004) amostrados segundo a norma NBR 10.007 (ABNT, 20004) os resíduos são classificados de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), que determina os riscos potenciais de danos ao meio ambiente e à saúde humana. A norma classifica os resíduos conforme a seguir:

- a) **Resíduo Classe I - Perigosos:** são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas podem:

- apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo, de forma significativa, para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças;
 - apresentar riscos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;
 - ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos, conforme definido na norma NBR 10.004 (ABNT, 2004);
- b) **Resíduo Classe II - Não perigosos:** são aqueles que não se enquadram na classificação de Resíduo Classe I – Perigosos; alguns dos resíduos desta classe encontrem-se listados no Anexo H NBR 10.004(ABNT, 2004).
- c) **Resíduo Classe IIA - Não Inertes:** são aqueles que não se enquadram como resíduos Classe I - Perigosos ou resíduo classe IIB – inertes. Os não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- d) **Resíduo Classe IIB - Inertes:** são aqueles que quando amostrados segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004) e outros testes não tiveram seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Os estudos realizados nos cascalhos *onshore* do norte do Espírito Santo (PETROBRAS, 2005; BORGES, 2006) indicam sua classificação como classe II-A – não inerte.

2.4.3.3 Propriedades Físicas e Mineralógicas

Os cascalhos de perfuração estudados são provenientes da bacia sedimentar Brasileira. Uma maneira de classificar rochas sedimentares é através do tamanho (distribuição granulométrica), forma, textura e arredondamento (PERONI, 2003).

A distribuição granulométrica de cascalhos de perfuração pode ser observada na Tabela 2.5. A maior fração encontrada é a de areia, seguida por silte e argila na maior parte dos estudos citados. Essa distribuição se baseia na tabela de Wentworth (1922).

Tabela 2.5 – Distribuição granulométrica de cascalhos de perfuração

Distribuição Granulométrica	FERNARI (2005) (% em volume)	FERNARI (2005) (% em volume)	PIRES (2009) (%)	MEDEIROS (2010) (%)
Argila (< 2 μ m)	18,16	16	19,3	6,78
Silte (2 \leq x \leq 62 μ m)	24,81	22	62,5	40,87
Areia (62 \leq x \leq 2000 μ m)	54,11	58	18,1	52,35
Cascalho (> 2000 μ m)	2,29	4	0,2	N.A.

Nota: N.A.- Não apresentado

Os conceitos de forma, textura e arredondamento são menos difundidos e por isso serão aqui definidos de acordo com alguns autores para facilitar a leitura.

Segundo Bustin *apud* Peroni (2003) a forma dos grãos é determinada por: estrutura interna (clivagem dos minerais), características de origem da rocha tal como diaclasamento ou acamadamento, litologia, dureza, fratura e transporte.

A forma do grão envolve atributos que se referem à morfologia externa das partículas. Isso inclui textura da superfície, arredondamento e forma dos grãos.

Forma se refere aos atributos envolvendo a morfologia tridimensional, isto é, a variação na proporção dos três eixos que definem a forma geométrica. Várias medidas são usadas, e as mais populares incluem: Esfericidade – proximidade de forma esferoidal, normalmente visual usando gráficos de comparação. Diagramas de Zing – plotar a relação dos eixos (menor / intermediário) x (intermediário / maior). Normalmente uma estimativa visual é mais utilizada do que medidas verdadeiras.

Já a textura da superfície se refere à irregularidades na superfície, tão pequenas, de maneira que elas não afetem a forma do grão. Feições incluem vários tipos de buracos e ranhuras. Essas características podem ter algo a ver com o ambiente deposicional. Contudo elas são difíceis de observar em partículas menores que 62µm sem a ajuda de um microscópio eletrônico de varredura.

O arredondamento é definido como o raio de curvatura médio dos cantos ao maior círculo inscrito. Esse tipo de medida é bastante complicado e subjetivo. A maneira mais simples de determinar arredondamento é comparar o arredondamento dos grãos de uma rocha ou sedimento a tabelas que comparam as formas em: angular, subangular, subarredondado e arredondado (PERONI, 2003).

Cascalhos de perfuração tendem a ter uma forma angular e podem ter sua distribuição granulométrica variando de cascalhos a argilas. A composição física dos cascalhos refletem os materiais geológicos que compõem o subsolo que foi perfurado, bem como outros componentes específicos sólidos e materiais químicos que originalmente compunham o fluido de perfuração (CHARLES; SAYLE, 2010).

Tendo em vista as variáveis envolvidas no processo de perfuração, a distribuição granulométrica, bem como sua composição mineral distinta (Tabela 2.6), faz-se necessária uma ampla amostragem para caracterizar os cascalhos da região que se pretende reaproveitar.

Tabela 2.6 – Composição mineralógica de cascalhos de perfuração

Composição mineralógica	FERNARI (2005)	PIRES (2009)	MEDEIROS (2010)
Quartzo	N.E.	E	E
Caulinita	E	N.E.	E
Esmectita	E	N.E.	N.E.
Ilita	E	N.E.	N.E.
Mica	N.E.	E	N.E.
Biotita	N.E.	E	N.E.
Microclínio	N.E.	N.E.	E
Calcita	N.E.	N.E.	E

Nota: E. – encontrado; N.E.- Não encontrado

2.4.4 Tratamentos e Destinação Final dos Cascalhos

Os cascalhos de perfuração de poços de petróleo, quando dispostos inadequadamente, poluem o solo, deterioram a paisagem urbana e constituem um passivo ambiental, pois são destinados a aterros sem tratamento prévio.

Está em vigor a lei de crimes ambientais (lei 6938/98), que responsabiliza o gerador do resíduo pela sua deposição final. Além da lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e em seu capítulo II art. 6º parágrafo VIII que tem como um dos princípios o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania.

Segundo os estudos de Marques (2005) e de Borges (2006), o cascalho de perfuração gerado no norte do Espírito Santo é classificado como não inerte, classe II- A. Os índices de cloretos [Cl] e cloreto de sódio [NaCl] são os que apresentam maior valor, segundo o grupo de estudos da Petrobras (MARQUES, 2005). Tais estudos ainda não são conclusivos, mas indicam que é importante que o cascalho de perfuração tenha um destino final ambientalmente adequado.

O item 2.2.6 abordou alguns dos métodos de tratamento secundário. Outras técnicas como as químicas, bioquímicas e termo-químicas de microencapsulamento (sub-base de estradas e cobertura de aterros sanitários), fazenda de lodo, extração com CO₂ supercrítico, desorção térmica indireta e incineração fizeram parte da análise de Souza e Lima (2002). Eles concluíram que a melhor aplicação para a empresa seria a disposição em diques impermeabilizados e o estudo para o tratamento do cascalho com CO₂ supercrítico. Porém, no Espírito Santo os diques, com impermeabilização, não são mais permitidos pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente – IEMA. Ainda nas conclusões as comparações entre viabilidade econômica e ambiental indicaram que ora a escolha beneficia uma e ora a outra.

As práticas de gerenciamento do resíduo proveniente da atividade de perfurações de petróleo variam consideravelmente em cada parte do mundo, e são vinculadas geralmente a requerimentos legais impostos pelas agências reguladoras que protegem a saúde humana e o meio ambiente em suas jurisdições particulares. No estado do Espírito Santo o órgão regulador, IEMA, não permite o uso de fluidos de perfuração de base oleosa, o que acarreta em um maior volume do resíduo gerado, porém com menores concentrações de contaminantes.

Segundo dados da Unidade Operacional – ES da Petrobrás referentes ao período de março 2007 a janeiro de 2008 foram perfurados 27 poços com volume de resíduos gerados de 6.943 m³ e gastos de R\$ 3.779.971,07 com a destinação dos resíduos. No norte do Espírito Santo o valor para a disposição por m³ no contrato feito para o ano de 2010, com outra empresa, estava com o custo de R\$ 300,00/m³.

Por enquanto o resíduo gerado na perfuração de poços de petróleo *onshore* do norte do Espírito Santo é disposto em aterro. O contrato para destinação no ano de 2010 foi feito com uma empresa terceirizada que transporta e descarta o resíduo em um aterro licenciado no município da Serra – ES, a cerca de 200 km da sua geração. O que perante a lei e a sociedade não isenta a geradora do resíduo de suas responsabilidades legais e ambientais.

2.5 Estudos de aproveitamento dos cascalhos em materiais de construção civil

Para se iniciar uma pesquisa que visa o aproveitamento de resíduos em materiais de construção é preciso conhecer o processo de geração do resíduo e suas variáveis como sazonalidade e possibilidade de mudanças no processo. A estimativa do volume gerado também é peça fundamental, pois pouca quantidade e alta variabilidade podem tornar o reuso inviável. Outros critérios a serem avaliados na investigação do resíduo são: o interesse da empresa geradora do resíduo, o elevado custo de disposição, oportunidade de reciclagem e risco de contaminação ambiental (JOHN, 2000).

As etapas que John (2000) sugere para o reaproveitamento de resíduos em materiais de construção foram exploradas e apresentadas no item 2.4. Sendo essas julgadas como oportunas para o uso dos cascalhos de perfuração em materiais de construção.

Outro fator importante para o estudo de novos materiais é o conhecimento das propriedades desses materiais. O conhecimento das propriedades que caracterizam um material é de fundamental importância na sua seleção com vista a determinada utilização. Por isso a caracterização dos cascalhos de perfuração se faz importante. Essa

caracterização deve compreender: análise química, caracterização de sua microestrutura, mineralogia, porosidade, características físicas e ambientais (JOHN, 2000).

Ainda existem poucos estudos sobre o uso de cascalhos de perfuração em materiais de construção se comparado à escoria de alto forno que hoje pode ser denominada de co-produto. Na indústria da construção civil os estudos (quadro 2.2) para reutilização de cascalhos de perfuração apontam a técnica de encapsulamento (estabilização/solidificação) e inertização dos resíduos com cimentos Portland em concretos (inclusive os para pavimentação), base para aterros, manutenção de estradas de terra e materiais cerâmicos. O quadro 2.2 sintetiza os estudos realizados e seus produtos finais com o uso dos cascalhos de perfuração.

Os estudos em sua maioria têm por finalidade encapsular os resíduos com o auxílio de matrizes cimentantes e não em fabricar produtos de construção de base cimentícia (AL-ANSARY, AL-TABBA, 2007; LEONARD; STEGEMANN, 2010).

Os mais avançados estão na área da cerâmica (VAQUEIRO, 2006; CHEN *et al.*, 2007; MEDEIROS, 2010), que já tem seus produtos finais sendo comercializados (PIRES, 2009).

Quadro 2.2 - Estudos realizados para uso dos cascalhos de perfuração

Pesquisadores	Produtos Finais
Al-Ansary; Al-Tabbaa, 2007	Inertização do cascalho com cimento e adições minerais
Leonard; Stegemann, 2010	Inertização do cascalho com cimento
Opete; Mangibo; Iyagba, 2010	Inertização do cascalho com cimento
Dhir <i>et al.</i> , 2010	Fíler em concreto asfáltico
Chen <i>et al.</i> , 2007	Blocos cerâmicos permeáveis, blocos cerâmicos para alvenaria.
Pires, 2009	Produção de blocos cerâmicos
Medeiros, 2010	Produção de blocos e tijolos cerâmicos

A técnica de solidificação e estabilização, chamada no Brasil de encapsulamento, é citada por diversos autores como alternativa para resíduos inorgânicos, não inertes e perigosos. Solidificação é o processo físico de converter resíduos em peças duráveis, densas e monolíticas com estrutura integral que é mais compatível para reuso, armazenamento ou aterro. Estabilização é um processo químico usado para minimizar o potencial de periculosidade e lixiviação do resíduo, convertendo-os em formas menos solúveis, móveis

ou tóxicas (LEONARD; STEGEMANN, 2010). Essas técnicas possuem muitas vantagens desde o mínimo consumo de energia e resultados com mínimas emissões de gases. Entretanto, alguns trabalhos indicam limitações e desvantagens.

O principal problema apontado é a alta concentração de componentes orgânicos, cloretos e bentonita que dificulta o processo de hidratação do cimento e pode diminuir a resistência à compressão do concreto. Além disso, a alta concentração de cloretos impede a utilização em concreto estrutural, pois pode provocar uma deterioração rápida da estrutura (AL-ANSARY; AL-TABBAA, 2007).

Existem limitações na aplicabilidade do sistema de encapsulamento. Segundo Veil (2002) os sistemas baseados em cimento não funcionam bem quando:

- a) os orgânicos contidos são superiores à 45% em massa;
- b) o resíduo tem menos de 15% de sólidos;
- c) excessiva quantidade de partículas finas está presente ou,
- d) as partículas são muito grandes.

Conhecendo as dificuldades de inertização dos cascalhos de perfuração, principalmente contaminados com fluidos a base de óleo e alta concentração de cloretos, Al-Ansary e Al-Tabbaa (2007) realizaram um estudo com diferentes aglomerantes e resíduos e compararam os resultados dos produtos com cascalhos *in natura* e tratados termicamente. Nesse estudo foram usados cascalhos sintéticos, com características dos cascalhos do Mar do Norte e do Mar Vermelho, associados ao cimento Portland e combinações de cimento com zeolitas, fibra de cascas de coco, cinzas volantes e um resíduo de cimenteiras. Foram moldados corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) e curados por 28 dias. As amostras produzidas foram testadas quanto à resistência à compressão axial e submetidas ao ensaio de lixiviação, além da avaliação microestrutural usando o microscópio eletrônico de varredura e a difração de raios x. Os resultados de resistência à compressão apontaram o potencial uso dos cascalhos na indústria da construção civil como materiais de construção alternativos. Foram sugeridos blocos de pavimentação e tijolos desde que a resistência à compressão alcançasse os limites normatizados. Quanto à lixiviação de óleos e cloretos, o cimento também obteve resultados satisfatórios. As análises microestruturais mostraram características gerais associadas com os produtos de hidratação do cimento. As pesquisadoras concluíram que existe potencial para o reuso dos cascalhos de perfuração em materiais de construção.

Opete *et al.* (2010) se basearam na pesquisa de Al-Ansary e Al-Tabbaa (2005) e investigaram apenas o cimento Portland como estabilizante. Os corpos de prova foram

moldados na forma cilíndrica com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, curados ao ar por 20 dias e submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial, lixiviação e a ciclos de molhagem e secagem. Os resultados foram satisfatórios quanto aos parâmetros avaliados e os autores concluíram que a produção de blocos para construção utilizando cimento é uma opção atrativa se comparada à disposição atual.

Leonard e Stegemann (2010), conhecendo as lacunas dos estudos de Al-Ansary e Al-Tabbaa (2007) e Joshi *et al.* (1995), escolheram um material com capacidades adsorptivas que combinado ao cimento Portland pudesse tratar os cascalhos de perfuração contaminados com óleos. Considerando o carvão ativado um material muito caro, eles escolheram as cinzas leves da produção do carvão ativado, uma pozolana, mas com alta proporção de carbono não queimado. Esse carbono deve se comportar como um material adsorptivo para componentes orgânicos e o cimento como um ativador das reações pozolânicas com seu pH alcalino e o suprimento de cálcio. Para verificar as interações nas variáveis avaliadas, um planejamento fatorial completo foi utilizado no programa experimental. Os fatores investigados foram a formulação do aglomerante, a proporção do resíduo e o tempo de cura. As variáveis resposta avaliadas foram a massa específica, a resistência à compressão axial, umidade, massa unitária, porosidade (usando os dados da massa unitária e da massa específica), condutividade hidráulica, lixiviação (medida de pH, cloreto e hidrocarbonetos) e a capacidade de neutralização ácida. Avaliados os resultados em separado e suas interações os pesquisadores recomendaram o reuso dos cascalhos como material para base e sub-base de pavimentação e aplicações que exigem baixa resistência à compressão; revestimento para aterros; coberturas para aterros; disposição em aterros para resíduos não inertes. Além da recomendação para investigação do uso como material para produção de tijolos, blocos e concretos leves.

Dhir *et al.* (2010) propuseram o uso de cascalhos de perfuração impregnados com fluidos base óleo em concretos asfálticos com a função de fíler. Impulsionados pela legislação do Reino Unido que não permite o descarte dos cascalhos contaminados com óleo ao mar, alto volume de geração e urgência em identificar alternativas para a atual destinação dos cascalhos, os pesquisadores propuseram a lavagem dos cascalhos e sua caracterização completa. As características avaliadas nas quatro diferentes amostras de cascalhos foram comparadas com o calcário utilizado em pavimentação da região do estudo. Os valores encontrados nas propriedades avaliadas são bem diferentes entre as amostras e se comparados com os preconizados pelas normas do país nenhuma das amostras atendem a todos os parâmetros avaliados, porém o autor sugere uma solução para cada item,

indica uma das amostras como de melhor desempenho em relação à referência e indica a substituição total ou parcial do calcário pelo cascalho de perfuração lavado como fíler nos concretos asfálticos.

Intitulado “Uma utilização inovadora de resíduos de perfuração como materiais de construção”, os pesquisadores Chen *et al.* (2007) propuseram a utilização de cascalhos de perfuração como substituto parcial do cimento em concretos, a produção de blocos permeáveis e de tijolos. Justificando a pesquisa nas condições cada vez mais severas da legislação ambiental em Taiwan, o crescente volume de resíduos e a redução do impacto ambiental do processo de perfuração foram investigados em laboratório as características dos cascalhos provenientes de três poços diferentes em Taiwan e as propriedades mecânicas dos materiais produzidos. Nos cascalhos caracterizados foram encontrados os minerais: barita, quartzo, moscovita e cloretos. Os blocos e tijolos atenderam as especificações técnicas. Já a substituição do cimento por cascalho não foi aconselhada. Outra conclusão importante foi sobre a variabilidade das características dos cascalhos que deve ser devidamente caracterizado antes de sua utilização. O melhor desempenho foi dos blocos permeáveis.

Pires (2009) sugere uma alternativa inovadora para o tratamento e disposição do cascalho de perfuração. O trabalho avaliou a incorporação de cascalho de perfuração na massa argilosa para produção de cerâmica vermelha. O método avaliado consiste no processamento industrial, realizado a elevadas temperaturas, a fim de se obter um material sólido, resistente e inerte. A pesquisa concluiu que a incorporação de cascalho de perfuração na produção de cerâmica vermelha é uma alternativa economicamente viável e tecnicamente segura para o tratamento e destinação final deste resíduo. Uma vez que o processo de queima, inerente à produção de peças cerâmicas, encapsulou e reduziu a baixos teores os constituintes perigosos do cascalho de perfuração. Os resultados obtidos nesse trabalho serviram de subsídios para a concessão de licença ambiental para utilização da técnica desenvolvida na remediação de cascalho de perfuração no Estado da Bahia.

Outro estudo de uso do cascalho de perfuração em materiais cerâmicos foi o de Medeiros (2010). Foram realizadas caracterizações nos cascalhos pelas técnicas de análise de fluorescência de raios-X, análise mineralógica por difração de raios-X (DRX), análise granulométrica por difração a laser, análises térmicas por termogravimetria e termodiferencial. As peças cerâmicas produzidas com diferentes percentuais de adição de

cascalho foram avaliadas através dos ensaios de absorção de água, retração linear de queima, tensão de ruptura à flexão, porosidade aparente, massa específica aparente, DRX e de cor. Os resultados obtidos concluíram que é possível a incorporação dos cascalhos para a produção de blocos e tijolos cerâmicos com redução do custo com matérias primas para fabricação dos mesmos.

Face às pesquisas citadas anteriormente pode-se concluir que para um melhor aproveitamento é necessário um estudo particular com os cascalhos da região. Decidiu-se por realizar um estudo com os cascalhos de perfuração da região norte do Espírito Santo (item 2.5.1) utilizando o cimento Portland.

Foram realizadas análises para caracterização dos cascalhos (FIALHO, *et al.*, 2011 a), testes piloto com a produção de concretos plásticos (FIALHO, *et al.*, 2011 b) e secos (FIALHO *et al.*, 2011 c) (Figura 2.7). Por avaliação preliminar dos resultados optou-se para este estudo a investigação do comportamento dos cascalhos de perfuração em concretos plásticos.

Figura 2.7 - Pavimento tipo PAVI-S



Fonte: Acervo Pessoal

2.5.1 Área deste estudo

A região escolhida para a coleta do material avaliado neste estudo foi o norte do Estado do Espírito Santo. Os principais motivos da escolha foram o interesse de empresas geradoras do resíduo na pesquisa e o grande volume de cascalho gerado sem destinação satisfatória.

Cabe ressaltar que o departamento de Engenharia Civil da UFES submeteu um projeto a principal geradora do resíduo para a investigação ampla da caracterização e possibilidades de uso dos cascalhos de perfuração como materiais de construção. Este

estudo então faz parte do escopo desse projeto. Porém, esse projeto ainda está em análise pela empresa.

A região *onshore* geradora compreende os municípios de Linhares, Jaguaré, São Mateus e Conceição da Barra e podem ser vistos na Figura 2.8. A região *offshore* não faz parte do estudo, pois a maior parte do cascalho gerado é descartada no mar ou trazida para disposição em aterro.

A carta estratigráfica da Bacia do Espírito Santo – Mucuri (Figura - Anexo A.1), região do estudo, demonstra as formações e membros (parte de uma formação) que podem ser encontradas durante as perfurações.

As bacias de Mucuri e Espírito Santo ocupam uma área explorável de 18.000 km² em sua parte terrestre, ao longo do litoral sul do Estado da Bahia e centro-norte do Estado do Espírito Santo, e estendem-se ainda para a plataforma continental, onde cerca de 200.000 km² encontram-se sob lâmina d'água de até 3.000 m (Vieira *et al.*, 1994).

As Formações que podem ser encontradas são chamadas de Rio Doce, São Mateus, Urucutuca, Cricaré, Caravelas, Abrolhos, Regência, Cabiúnas e Mariricu. Já os Membros são denominados de Itaúnas, Império e Mucuri (Vieira *et al.*, 1994).

A formação Rio Doce (de 0m a 793m) da bacia sedimentar do Espírito Santo possui os minerais: arenito hialino, grosseiro, subangular, quartzoso, feldspático, granatífero, desagregado; argilito verde-claro, de mole a semiduro e calcarenito creme-claro, bioclástico, micrítico, maciço, compacto (ANP, 2006).

O pacote sedimentar sinrifte da Bacia do Espírito Santo-Mucuri é conhecido como Formação Cricaré, tendo espessura estimada em 5.000 m; corresponde a conglomerados continentais, arenitos, coquinas e dolomitos, associados a folhelhos ricos em carbono orgânico (MILANI *et al.*, 2000).

A Formação Mariricu é formada por conglomerados, arenitos grossos arcosianos e folhelhos (Membro Mucuri) recobertos por um pacote de evaporitos e folhelhos negros conhecidos como Membro Itaúnas (MILANI *et al.*, 2000).

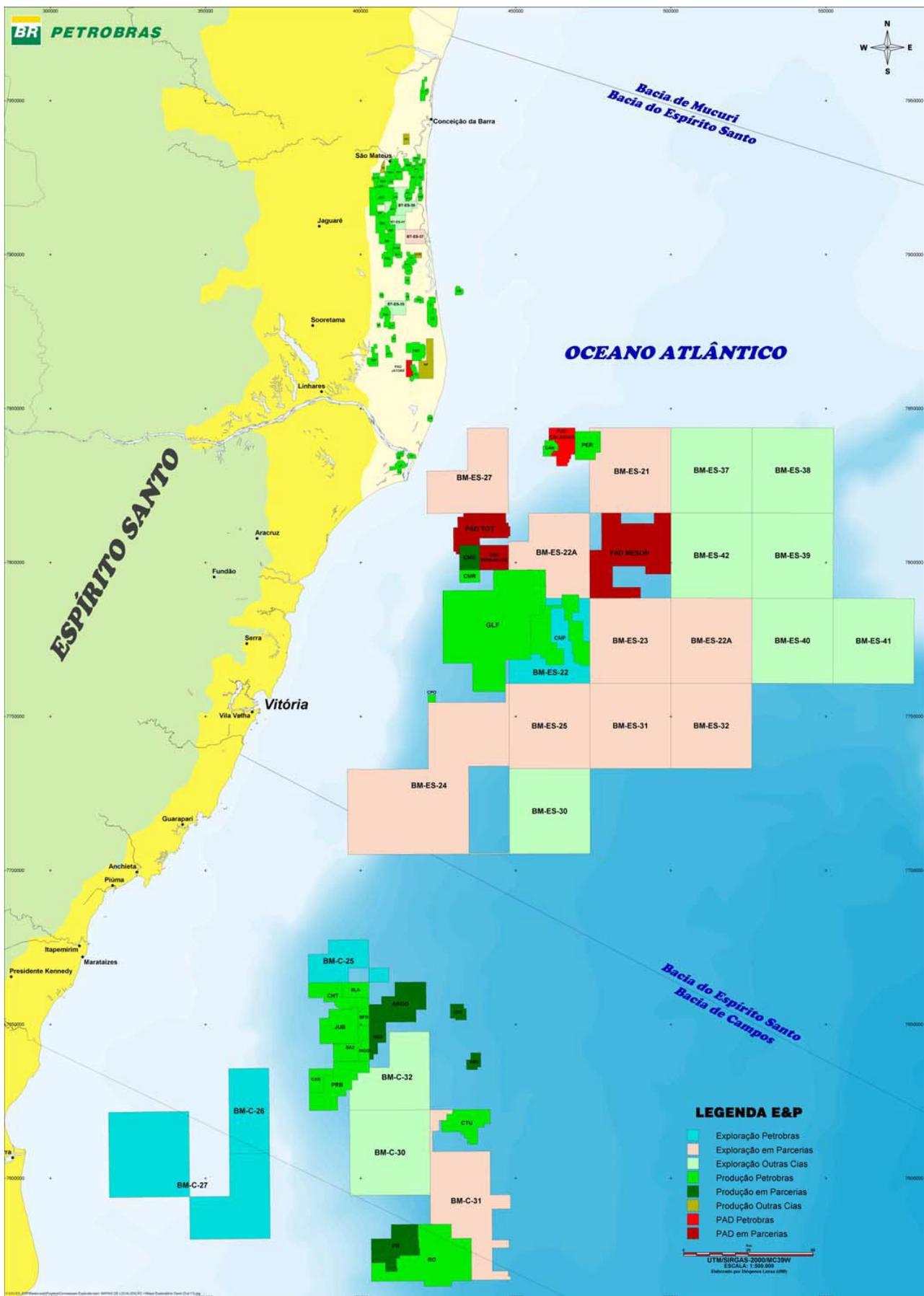
O Grupo Barra Nova consiste de arenitos grossos de fácies marinha marginal (Formação São Mateus) que grada para carbonatos no sentido do mar (Formação Regência) (MILANI *et al.*, 2000).

O Grupo Espírito Santo é a clássica seqüência de plataforma continental progracional, formada por uma fácies arenosa proximal (Formação Rio Doce) intercalada com

carbonatos (Formação Caravelas); o conjunto torna-se pelítico em seu contexto distal, junto ao talude e à bacia profunda (Formação Urucutuca) (MILANI *et al.*, 2000).

Na Formação Abrolhos intercalam-se os corpos ígneos com os sedimentos carbonáticos da Formação Caravelas e com os folhelhos da Formação Urucutuca (MILANI *et al.*, 2000).

Figura 2.8 - Área de exploração e produção de petróleo e gás no Espírito Santo



Fonte: Petrobras (2010).

Capítulo 3

“O experimento científico é uma tentativa de se capturar o pássaro da verdade”

João Luiz Calmon

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Analisando a revisão bibliográfica foram identificadas lacunas nos estudos dos cascalhos, principalmente em concretos e no Brasil.

Tendo como objetivo geral avaliar a possibilidade de substituição e adição de diferentes cascalhos em concretos plásticos, hipóteses foram levantadas e verificadas por meio de um programa experimental.

Para delinear os experimentos foram realizados um planejamento de experimentos, a caracterização dos materiais e a definição dos procedimentos experimentais que estão apresentados neste capítulo.

3.1 Planejamento dos experimentos

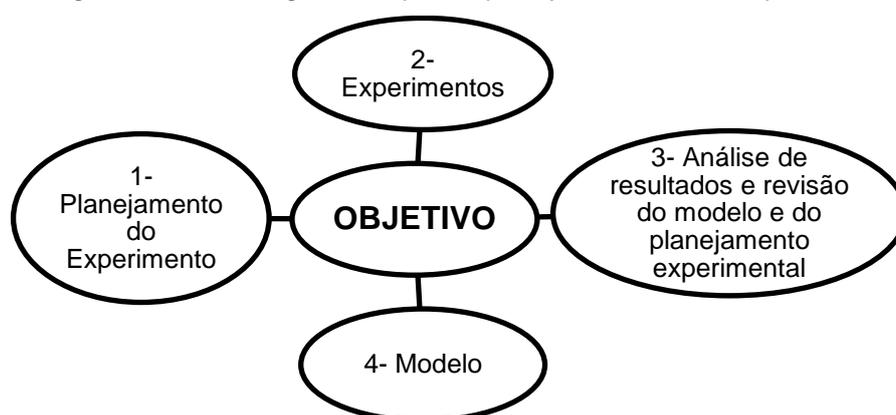
A metodologia conhecida como projeto de experimentos em modo contemporâneo foi introduzida por Fischer em 1935 e inicialmente aplicada a experimentos de agricultura. Atualmente, projeto de experimentos tem sido aplicado virtualmente em todas as áreas de conhecimento (RIBEIRO; TEN CATEN, 2010).

Trata-se de uma metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. O uso de projeto de experimentos permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador (Figura 3.1) (RIBEIRO; TEN CATEN, 2010).

O planejamento de experimentos é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser

coletadas durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística possível na resposta e o menor custo (RIBEIRO; TEN CATEN, 2010). O planejamento do experimento desenvolve o papel principal na solução futura do problema que inicialmente motivou o experimento (MONTGOMERY, RUNGER, 2009).

Figura 3.1 – Estratégia inicial para o planejamento de um experimento



Fonte: adaptada de RIBEIRO; TEN CATEN (2010).

3.1.1 Variáveis resposta

As variáveis respostas⁵ estudadas neste programa experimental, com vistas a atingir os objetivos do trabalho, são todas mensuráveis, quantitativas e estão apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis resposta

Designação	Alvo
Resistência à compressão uniaxial	35 MPa
Resistência à tração por compressão diametral	3 MPa
Módulo de elasticidade	30 GPa
Absorção de água	< 10 %
Massa específica	2,3 kg/dm ³

Fonte: Acervo pessoal

Os alvos estabelecidos para as variáveis resposta foram delimitados por meio do estudo de dosagem para os concretos e por estudos de Metha e Monteiro (2008).

3.1.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis⁶ desta pesquisa foram:

⁵ Variáveis resposta podem ser definidas como os aspectos do produto que podem ser medidos e que permitem quantificar as características de qualidade (RIBEIRO; TEN CATEN, 2010).

⁶ Os fatores controláveis são um subconjunto dos parâmetros do processo; são aqueles parâmetros do processo que foram eleitos para serem estudados a vários níveis no experimento (RIBEIRO; TEN CATEN, 2010).

64 Materiais e Métodos

- a) percentual de substituição;
- b) idade.

Sendo que apenas a variável resposta resistência à compressão teve o fator controlável idade avaliado.

3.1.3 Fatores constantes

Para possibilitar comparativos, alguns fatores são comumente mantidos constantes. Para todos os experimentos desta pesquisa foram fatores constantes⁷:

- a) relação a/c;
- b) origem dos materiais;
- c) preparação e moldagem dos corpos de prova.

3.1.4 Definição dos níveis dos fatores controláveis

Os níveis dos fatores controláveis foram definidos por testes experimentais e revisão da literatura. As substituições de areia fina por cascalhos de perfuração da primeira fase da perfuração, denominado CAP I, foram avaliadas em testes piloto (FIALHO *et al.*, 2011 a).

O cascalho de perfuração da terceira fase, denominado CAP III, foi adicionado em diferentes percentuais em relação à massa de cimento do concreto de referência. As idades avaliadas são ortodoxas em estudos de materiais cimentícios.

Como foram avaliadas duas amostras distintas de cascalhos de perfuração, os experimentos foram conduzidos e analisados separadamente. A tabela 3.2 apresenta os níveis dos fatores controláveis para o CAP I e a tabela 3.3 os níveis dos fatores controláveis para o CAP III.

Tabela 3.2 - Níveis dos fatores controláveis para cascalho I

Fator	Nº níveis	Níveis	Unidade
Percentual de substituição	4	0,20,50,100	%
Idade	3	3,7,28	dias

Fonte: Acervo pessoal

Tabela 3.3 – Níveis dos fatores controláveis para cascalho III

Fator	Nº níveis	Níveis	Unidade
Percentual de adição	4	0,5,10,15	%
Idade	3	3,7,28	dias

Fonte: Acervo pessoal

3.1.5 Definição do modelo estatístico

Foram utilizados os modelos estatísticos de comparação de vários grupos e o projeto fatorial com dois fatores.

⁷ Os fatores constantes são os parâmetros do processo que não entram no experimento e que são mantidos constantes durante o experimento (RIBEIRO;TEN CATEN, 2010).

Para as variáveis de resposta resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água, massa específica e índice de vazios foram utilizadas a comparação de vários grupos (One-way Analysis of Variance). Esses experimentos envolvem uma variável de resposta e um fator controlável a vários níveis.

Para a variável resposta resistência à compressão axial foi realizado o projeto fatorial com dois fatores (Two-way Analysis of Variance). Os projetos fatoriais cruzados são mais econômicos e permitem que se avaliem interações.

3.1.6 Matriz experimental e organograma da pesquisa

Visando a minimização das variáveis de ruído que possam influenciar no resultado das variáveis respostas foi criada uma matriz experimental aleatorizada da ordem dos ensaios.

Tabela 3.4 - Matriz experimental

Rodada	Ordem	Fator A	Fator B
1	1	0	0
2	3	CAP I	20
3	6	CAP I	50
4	4	CAP I	100
5	7	CAP III	5
6	2	CAP III	10
7	5	CAP III	15

Nota: Fator A – Tipo de cascalho; Fator B – Percentual de substituição/adição.

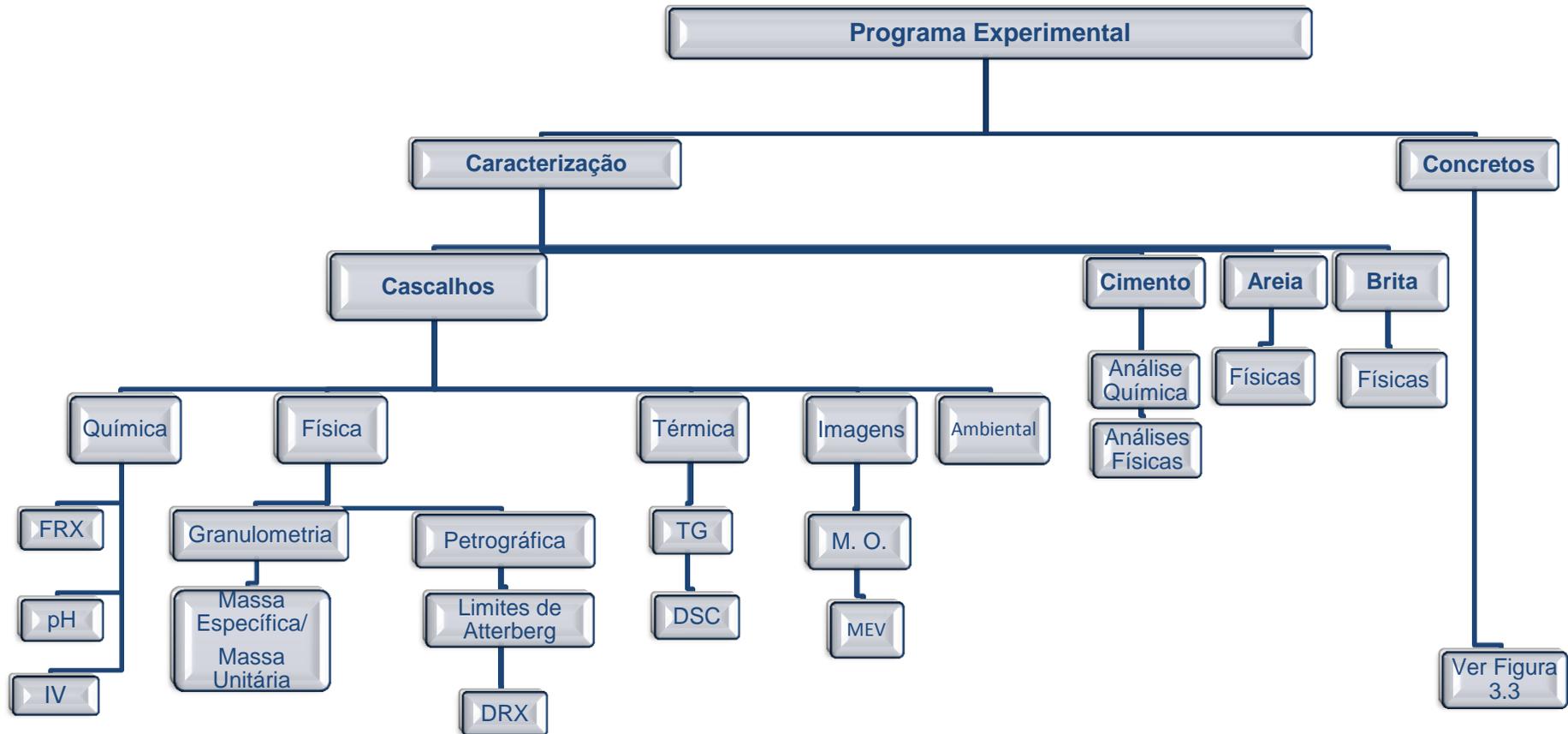
Fonte: Acervo pessoal

A Tabela 3.4 mostra a ordem de produção dos sete traços de concreto. Foram utilizados os cascalhos de perfuração denominados CAP I e CAP III. O CAP I foi substituído pela areia fina em distintos percentuais. Já o CAP III foi adicionado em diferentes percentuais em relação à massa de cimento. Os procedimentos dos ensaios foram aleatórios. Já para as máquinas e operadores as mesmas sistemáticas foram mantidas.

Os cascalhos oriundos de poços não identificados da região norte do Espírito Santo foram submetidos a uma série de testes, a fim de determinar suas propriedades químicas, físicas, térmicas e microestruturais⁸. A Figura 3.2 apresenta um organograma das fases de caracterização dos materiais avaliados e a Figura 3.3 o programa experimental dos concretos.

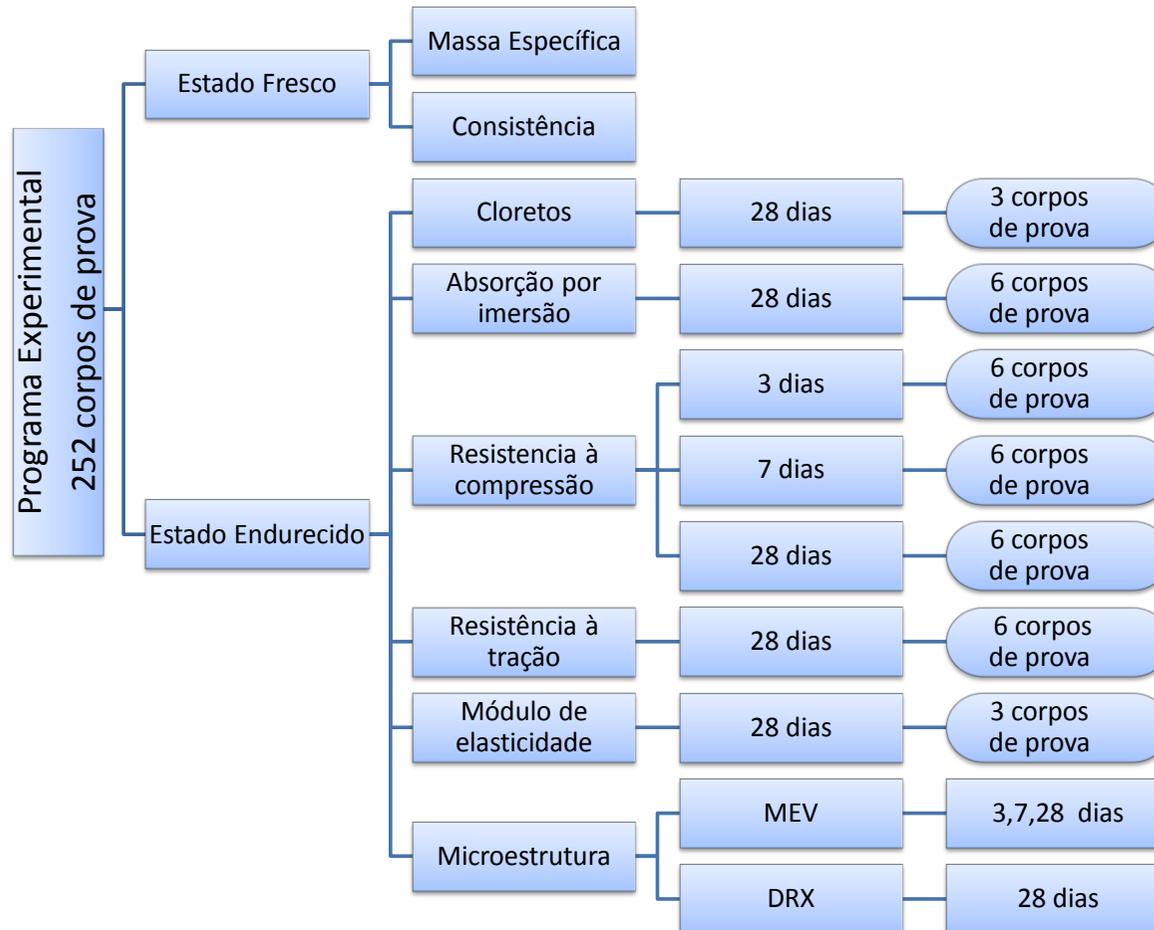
⁸ A amostragem é fundamental para uma caracterização dos cascalhos da região norte do Espírito Santo nos seus diferentes estágios de perfuração. Neste trabalho a caracterização foi restrita às amostras obtidas de um determinado poço.

Figura 3.2 – Programa experimental



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 3.3 – Programa Experimental - Concretos



Fonte: Acervo pessoal.

3.2 Metodologia de caracterização dos cascalhos de perfuração

A caracterização dos cascalhos de perfuração contou com diversas técnicas dentre as quais serão apresentadas neste estudo o potencial hidrogeniônico (pH), a espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX), a espectroscopia no infravermelho (IV), difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG), calorimetria diferencial exploratória (DSC), composição granulométrica, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise ambiental, análise petrográfica e demais caracterizações físicas para agregados miúdos.

Antes de serem submetidos a todos os ensaios, os cascalhos foram secos em estufa a 100°C por 24 horas, destorroados manualmente, quarteados e preparados de acordo com cada ensaio (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Preparação dos cascalhos



Fonte: Acervo pessoal.

O pH das amostras foi determinado seguindo o procedimento estabelecido pela EMBRAPA (1997) com auxílio de um pHmetro da marca Quimis no Laboratório de Caracterização Ambiental - LACAR da UFES.

Para a análise química, por FRX, o material foi prensado em prensa manual em forma de pastilha, com diâmetro de 15 mm. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) são analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material após seco em estufa por 24 h em temperatura de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos. Esses ensaios foram feitos no laboratório CT-GÁS em Natal – RN.

O espectro IV foi obtido em um espectrofotômetro Perkin Elmer FT-IR 1725-X, com varredura de 4000 a 400 cm^{-1} . A amostra foi caracterizada na forma de pastilha feita a

Capítulo 3- Programa Experimental

partir do cascalho e KBr⁹ prensada. As análises foram realizadas no Laboratório de petróleo - LABPETRO na UFES.

A técnica de difração de raios X permite a identificação dos minerais e dos demais argilo-minerais associados. O cascalho de perfuração foi moído manualmente até que toda massa pudesse ser passada na peneira 200 mesh (74µm) e acondicionada em porta amostra de alumínio para a análise em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A amostra foi analisada sob voltagem 40 KV e amperagem de 30 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,02°/seg, de 3° a 70° 2 θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios-X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda (λ) são: K α 1,5418 Å e K β_1 1,3922 Å. As interpretações foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se software para captura de dados. Para a interpretação de dados foi acessado o banco de dados do Joint Committee for Powder Diffraction Standards (JCPDS) do International Centre for Diffraction Data (ICDD).

A TG é uma técnica de análise térmica em que a variação de massa da amostra (perda ou ganho de massa) é determinada como uma função da temperatura e/ou tempo, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura. As curvas TG/DTG (derivada da curva termogravimétrica) foram obtidas na faixa de temperatura entre 25 e 1000 °C, utilizando termobalança modelo TGA 50 da marca Shimadzu, sob atmosfera dinâmica de ar (50 mL min⁻¹), razão de aquecimento de 20°C.min⁻¹, utilizando cadinho de platina contendo massa de amostra de 179 mg. Uma curva de calibração denominada branco também foi realizada para subtração de possíveis ruídos do aparelho. Os resultados foram tratados no software TA 60, versão 2.20 da Shimadzu.

A DSC é a técnica na qual se mede a diferença de energia fornecida à substância e a um material referência, em função da temperatura enquanto a substância e o material são submetidos a uma programação controlada de temperatura. As curvas DSC foram obtidas na faixa de temperatura entre 25 e 550 °C, em célula calorimétrica modelo DSC 50 da marca Shimadzu, sob atmosfera dinâmica de nitrogênio (50 mL min⁻¹), razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹ e utilizando cápsulas de alumínio parcialmente fechadas, contendo aproximadamente 2 mg de amostra. As curvas DSC foram obtidas em atmosfera de nitrogênio devido à sensibilidade do sensor calorimétrico a atmosfera

⁹ KBr – Brometo de potássio.

oxidante. As análises térmicas (TG e DSC) e a difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Materiais Carbonosos do departamento de física da UFES.

A petrografia é um ramo da petrologia que tem por objetivo a descrição macro, meso e microscópica de rochas, considerando as suas relações texturais, estruturais e mineralógicas. A análise mesoscópica é complementada por análise microscopia de seção delgada por luz transmitida.

A análise petrográfica foi apresentada na forma de um certificado contendo a porcentagem dos minerais (estimativa visual), descrição meso e microscópica, aspectos texturais e estruturais, grau de alteração, tipo e nome da rocha. O potencial reativo não foi investigado por não fazer parte do escopo deste projeto.

A análise petrográfica foi baseada na norma NBR 15.577-3 (ABNT, 2008), e realizada no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas do Departamento de Geologia, da UFES, por um geólogo. A análise só foi realizada no CAP I, pois o CAP III é muito fino para tal.

A determinação da composição granulométrica dos cascalhos de perfuração, denominados CAP I e CAP III, seguiu o método descrito pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2009). Após o peneiramento mecânico e manual, o material passante na abertura de malha 100 # foi separado e analisado em um granulômetro a laser da marca Sympatech no LEMAC na UFES.

A forma do grão influencia demasiadamente no desempenho das argamassas e concretos. Segundo Araújo *et al.* (2003), o ensaio de peneiramento não é suficiente para evidenciar a influência da forma dos grãos, então para suprir essa deficiência, utilizou-se a análise de imagem, através do programa ImageJ versão 1.45 (RASBAND, 2010), para determinação dos parâmetros necessários à forma dos grãos.

O programa ImageJ é um software livre para processamento e análise de imagens. O software foi desenvolvido por Wayne Rasband, EUA. O ImageJ possui ferramentas de processamento de imagem padrão, tais como ajuste de brilho e contraste, nitidez e detecção de borda. Além disso, pode calcular área, perímetro, medir distâncias e ângulos.

Para elaboração dos parâmetros para classificar os grãos por análise de imagem, foi utilizado o esquema ilustrativo para orientar a avaliação da forma dos grãos da NBR 7389-1 (ABNT, 2009). Essas imagens foram devidamente tratadas no programa e forneceram resultados satisfatórios para a classificação da forma dos grãos. Esses parâmetros são o grau de esfericidade (alto ou baixo) e o grau de arredondamento

Capítulo 3- Programa Experimental

(anguloso, subanguloso, subarredondado e arredondado). Essa técnica de caracterização esta descrita na integra no artigo que será publicado por Fialho *et al.* (2012).

Os cascalhos *in natura* e os concretos com substituição e adição de cascalhos foram classificados ambientalmente de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004).

As amostras de CAP I e CAP III foram secas a 100°C, destorroadas manualmente, acondicionadas e lacradas em garrafas plásticas. Já os concretos, após o ensaio de resistência à compressão axial, foram quebrados com o auxílio de um martelo, a dimensões máximas de 9,5 mm e também acondicionados da mesma maneira que os cascalhos.

Os concretos escolhidos para esses ensaios foram dos traços S100 e A15 por conterem maior teor de substituição ou adição de cascalhos. Os demais traços não foram analisados por inviabilidade financeira.

O laboratório Bioagri Ambiental foi o escolhido para a realização dos testes na massa bruta, em extratos lixiviados e solubilizados por ser um laboratório acreditado pela ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária e pelo INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

3.3 Caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos

Para o preparo dos 252 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20 cm, foram utilizados: como aglomerante o cimento CP V ARI, como agregado miúdo a areia de rio e a areia de jazida, como agregado graúdo uma brita de origem granítica, aditivo superplastificante de 3º geração e os dois tipos de cascalhos de perfuração. Sendo 175 kg de cimento, 500 kg de agregado graúdo, 400 kg de agregado miúdo, 0,6 kg de aditivo e 95 l de água aproximadamente.

3.3.1 Cimento

O cimento CP V ARI utilizado na pesquisa, com fabricação em 09/08/2011, teve sua caracterização química fornecida pelo fabricante e as análises físicas foram realizadas no LEMAC – UFES e estão apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Caracterização do cimento CP V ARI

Propriedades Determinadas CP V ARI		Teores	Método de Ensaio	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)
Análises físicas				
Massa específica (g/cm ³)		3,05	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	4861	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥3000
	Finura - resíduo na peneira 400# mesh	1,7	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Tempos de Pega	Início de Pega (min)	125	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de Pega (min)	183	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≤ 600
Água de Consistência - Pasta (%)		30	NBR NM 43 (ABNT, 2002)	N.E.
Análises químicas				
Perda ao fogo - PF (%)		4,45	NBR NM 18(ABNT, 2004)	≤ 4,5
SiO ₂ (%)		19,48	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Al ₂ O ₃ (%)		5,19	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Fe ₂ O ₃ (%)		3,09	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
CaO (%)		63,97	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
MgO (%)		0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 6,5
SO ₃ (%)		2,81	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 3,5
K ₂ O (%)		0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Resíduo Insolúvel - RI (%)		0,65	NBR NM 15 (ABNT, 2004)	≤1,0
Resistência à compressão				
1dia (MPa)		30,4	NBR 7215(ABNT, 1997)	≥ 14
3 dias (MPa)		42,6	NBR 7215(ABNT, 1997)	≥ 24
7 dias (MPa)		47,3	NBR 7215(ABNT, 1997)	≥ 34

Nota: N.E. – Não especificado.

Fonte: Cortesia de Cimentos Holcim (2011).

3.3.2 Agregado miúdo

3.3.2.1 Areia

Foram utilizadas duas areias para melhor empacotamento da mistura. A areia natural, denominada areia G, foi extraída de uma jazida em Vila do Riacho, Aracruz, ES. As principais características estão apresentadas na Tabela 3.6 e sua curva de distribuição granulométrica esta inserida na Figura 3.6 e comparada com os limites inferiores e superiores para agregados em concreto da norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

Na Tabela 3.6 também estão os resultados dos ensaios da areia, denominada areia F, proveniente da pedreira Brasitália, localizada em Serra – ES, e sua curva de distribuição granulométrica esta inserida na Figura 3.6.

Analisando as curvas de distribuição granulométricas é possível perceber que a areia F é uma areia fina em relação à areia G.

3.3.2.2 Cascalho de perfuração

Nesta pesquisa foram selecionados dois tipos distintos de cascalhos de perfuração. O cascalho de perfuração de primeira fase denominado CAP I tem características físicas semelhantes a uma areia e o cascalho de perfuração de terceira fase denominado CAP III

Capítulo 3- Programa Experimental

se assemelha mais a um silte e/ou argila. Deste modo, essa nomenclatura cascalho se refere a um material de dimensão máxima característica similar a de uma areia natural.

As características físicas do CAP I estão na Tabela 3.6. Sua curva granulométrica também foi inserida na Figura 3.5 e pode ser comparada com a areia natural e os limites da norma NBR 7211 (ABNT, 2009). O material que passou na peneira 100 # (malhas) foi analisado por difração a laser e sua curva granulométrica é apresentada na Figura 3.6.

O ensaio para a determinação da composição granulométrica do CAP III foi realizada pelo método do peneiramento e o material que passou na peneira 100 # (malhas) foi analisado por difração a laser (Figura 3.6). Outras caracterizações físicas estão apresentadas na Tabela 3.6 e as demais caracterizações no item 4.1, por ser um dos objetivos desta dissertação.

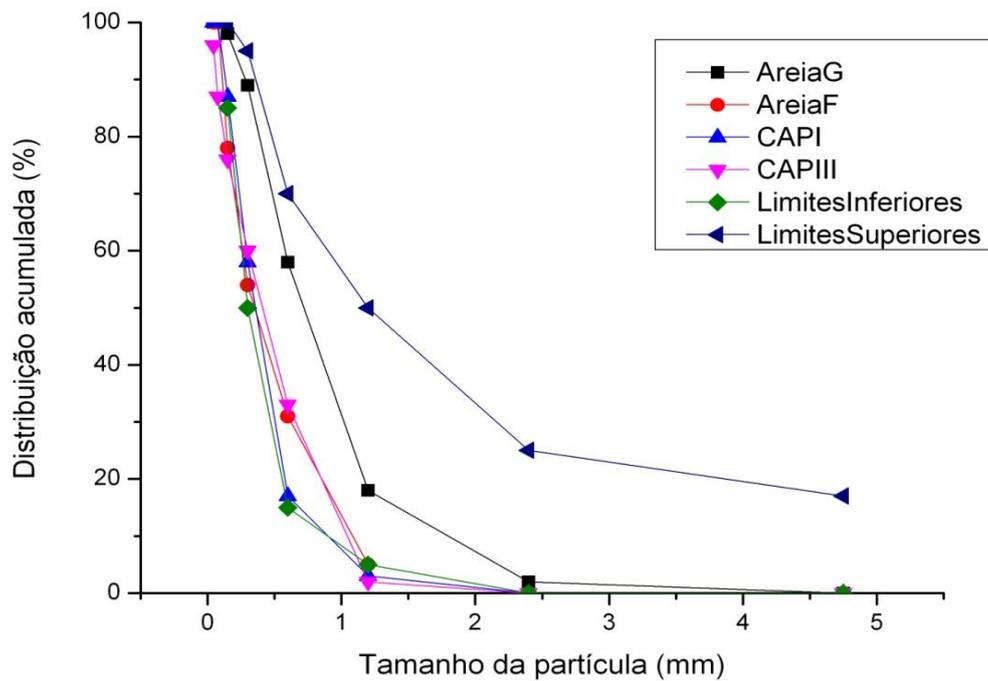
Tabela 3.6 - Caracterização da areia G, areia F CAP I e CAP III

CARACTERÍSTICA ANALISADA	AREIA G	AREIA F	CAP I	CAP III	UN.	MÉTODO DE ENSAIO
Dimensão Máxima Característica	2,36	2,36	1,18	1,18	mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de Finura	2,65	1,7	1,65	1,7	-	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa Específica	2,64	2,65	2,58	2,67	kg/dm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa Unitária- Método C	1,48	1,63	1,19	1,16	kg/dm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Volume de Vazios	43,1	38,5	54	56,5	%	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Material Pulverulento	0,43	4,96	0,01	68,5	%	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Absorção	0,62	0,54	2,25	4,33	%	NBR NM 30 (ABNT, 2000)
Matéria Orgânica	Mais clara	Mais escura	N.A.	N.A.	-	NBR NM 49 (ABNT, 2001)

Nota: Areia G – areia grossa; Areia F – areia fina; CAP I – cascalho de perfuração da primeira fase; CAP III – cascalho de perfuração da terceira fase; N.A. - não avaliado.

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 3.5 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos via peneiramento

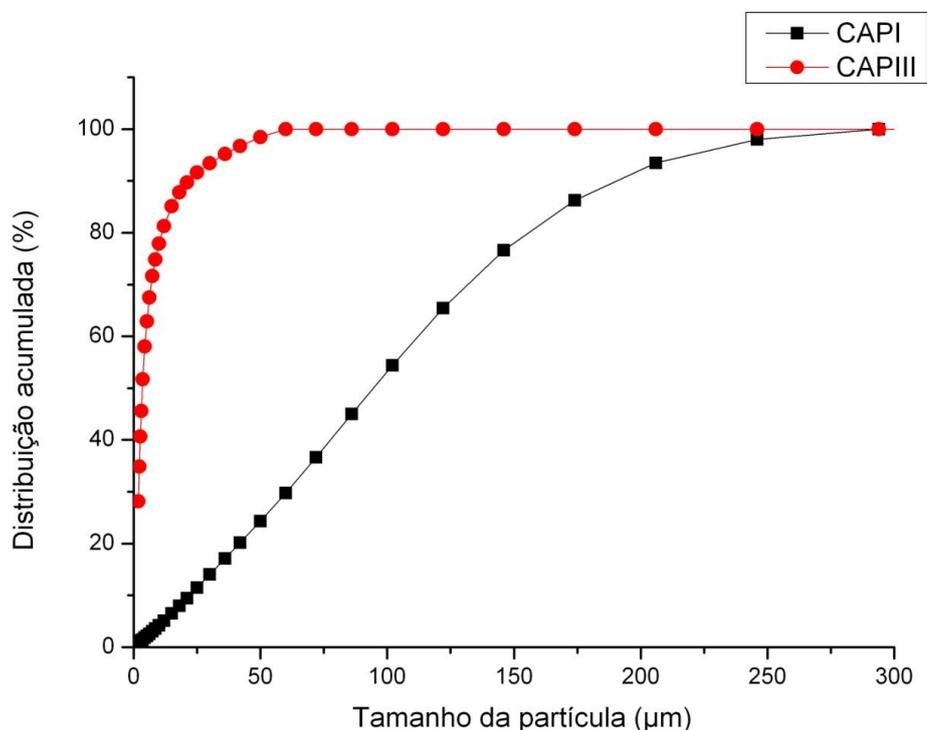


Fonte: Acervo pessoal.

As areias G e F foram escolhidas para melhorar o empacotamento das partículas permitindo assim que o concreto obtivesse uma textura mais fechada. A escolha da areia F em substituição ao CAP I nos concretos (Tabela 3.8) se deu pela similaridade de suas distribuições granulométricas. Evitando assim um maior número de variáveis a se analisar.

Capítulo 3- Programa Experimental

Figura 3.6 – Curva de distribuição granulométrica obtida via difração à laser da fração passante na peneira #100 do CAP I e CAP III



Fonte: Acervo pessoal.

3.3.3 Agregado graúdo

O agregado utilizado no estudo é proveniente de rochas graníticas e possui formas bastante irregulares, sem nenhuma predominância marcante de formas cúbicas ou lamelares. Procederam-se neste a lavagem na peneira de abertura 6,3 mm para eliminar possíveis impurezas que de alguma forma pudessem influenciar nas propriedades do concreto. Posteriormente a amostra foi seca ao ar sobre lona e acondicionada em tambores plásticos.

Na Tabela 3.7 estão os resultados dos ensaios do agregado graúdo proveniente da pedreira Pervap, localizada em Serra – ES.

Tabela 3.7 – Caracterização do agregado graúdo

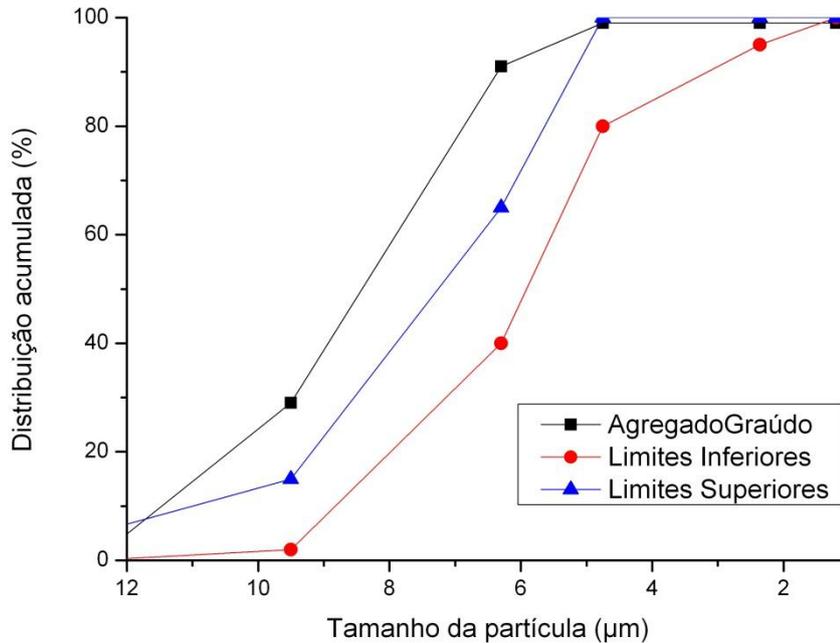
CARACTERÍSTICA ANALISADA	MÉTODO DE ENSAIO	AGREGADO GRAÚDO
Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2009)	6,23
Dimensão máxima característica	NBR 7211 (ABNT, 2009)	12,5 mm
Massa específica	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,73 kg/dm ³
Massa unitária	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	1,44 kg/dm ³
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	0,7%

Fonte: Acervo pessoal.

A distribuição granulométrica do agregado graúdo esta apresentada na Figura 3.7. Os limites inferiores e superiores preconizados pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009) mostram

que o material tem dimensão acima do limite superior para a zona granulométrica analisada.

Figura 3.7 - Distribuição granulométrica agregado graúdo



Fonte: Acervo pessoal.

É importante ressaltar que as dimensões dos grãos do agregado são compatíveis com as dimensões das formas utilizadas para moldar os corpos de prova de concretos.

3.4 Procedimentos Experimentais

3.4.1 Dosagem do concreto

A dosagem dos concretos seguiu o método do EPUSP/IPT (HELENE; TERZIAN, 1992). As dosagens utilizadas para a preparação dos concretos estão apresentadas Tabela 3.8 e Tabela 3.9.

Tabela 3.8 - Dosagem dos materiais em massa (materiais secos)

COMPOSIÇÃO	CIMENTO	AREIA G	AREIA F	BRITA	CAP I	ADITIVO	A/C
CR	1	1,53	0,65	2,88	0	0,07	0,53
S 20	1	1,53	0,52	2,88	0,13	0,27	0,53
S 50	1	1,53	0,32	2,88	0,32	0,82	0,53
S 100	1	1,53	0	2,88	0,65	0,82	0,53

NOTA: CR – referência; S20 - 20% substituição de areia; S50 - 50% substituição de areia; S100 - 100% substituição de areia; A/C Relação água cimento.

Fonte: Acervo pessoal.

Capítulo 3- Programa Experimental

Tabela 3.9 - Dosagem dos materiais em massa (materiais secos)

COMPOSIÇÃO	CIMENTO	AREIA G	AREIA F	BRITA	CAP III	ADITIVO	A/C
CR	1	1,53	0,65	2,88	0	0,07	0,53
A 5	1	1,53	0,65	2,88	0,05	0,11	0,53
A 10	1	1,53	0,65	2,88	0,1	0,07	0,53
A 15	1	1,53	0,65	2,88	0,15	0,14	0,53

NOTA: CR – referência; A5 - 5% adição de cascalho; A10 - 10% adição de cascalho; A15 - 15% adição de cascalho; A/C Relação água cimento.

Fonte: Acervo pessoal.

3.4.2 Produção dos Concretos

Para a mistura dos materiais foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado e os materiais foram vertidos na seguinte sequência: metade da água, toda a brita, todo o cimento, toda a areia, e todo o resíduo. Após a mistura foi adicionado o restante da água e o aditivo de acordo com as proporções citadas nas Tabelas 3.8 e Tabela 3.9.

No estado fresco foram feitos os ensaios de abatimento do tronco de cone para medir o índice de consistência do concreto (Figura 3.8 a) e avaliar a sua trabalhabilidade segundo a NBR 7223 (ABNT, 1992) e o ensaio de massa específica (Figura 3.8 b) segundo a NBR 9833 (ABNT, 2009). A moldagem e cura dos corpos de prova seguiram as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2003), sendo feito adensamento manual (Figura 3.8 c), com exceção da composição S100, onde foi utilizado o vibrador de imersão devido ao seu índice de consistência. Os corpos de prova foram desformados após 24 horas da moldagem, identificados e acondicionados em taques contendo solução supersaturada de cal.

Figura 3.8 – Concreto fresco

a) Ensaio abatimento



b) Determinação da massa específica



c) Moldes após preenchimento com concreto



Fonte: Acervo pessoal

3.4.3 Ensaios no estado endurecido

3.4.3.1 Ensaios de Resistência Mecânica

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias; tração por compressão diametral e módulo de elasticidade aos 28 dias de idade, sendo retirados da cura em imersão um dia antes da realização do ensaio para retificação das faces. Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados conforme especificações da NBR 5739 (ABNT, 2007), os de resistência à tração por compressão diametral segundo a NBR 7222 (ABNT, 2010) e os ensaios de módulo de elasticidade segundo a NBR 8522 (ABNT, 2003). Os ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral foram realizados no Laboratório de materiais de construção – LEMAC na Universidade Federal do Espírito Santo – UFES e os ensaios de módulo de elasticidade no Laboratório de Engenharia Civil no Instituto Federal do Espírito Santo - IFES.

3.4.3.2 Durabilidade

A água costuma ser o fator central para a maioria dos problemas de durabilidade no concreto. Nos sólidos porosos, sabe-se que a água é a causa de muitos tipos de processos físicos da degradação. Como veículo para transporte de íons agressivos, a água pode ser também a fonte de processos químicos de degradação. Os fenômenos físico-químicos associados ao transporte de água em sólidos porosos são controlados pela permeabilidade do sólido (METHA; MONTEIRO, 2008).

Para a determinação da absorção de água foram seguidas as especificações da norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 2009).

3.4.3.3 Microestrutura

O conhecimento da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes do concreto, assim como da relação entre elas, serve para auxiliar no controle das suas propriedades (METHA; MONTEIRO, 2008).

Com o intuito de verificar se a adição de cascalhos provocou mudanças representativas na pasta de cimento hidratada e na zona de transição, em relação à amostra referência, as amostras de concretos foram investigadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Capítulo 3- Programa Experimental

As análises realizadas na presente pesquisa visaram avaliar a microestrutura das amostras extraídas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial, sendo coletadas no centro dos corpos de prova aleatoriamente entre as seis unidades ensaiadas nas idades de 3, 7 e 28 dias.

As amostras tiveram sua hidratação interrompida aos 3, 7 e 28 dias com a adição de acetona P.A. durante 5 dias. Após esse tempo elas foram levadas para a estufa durante 24 horas. Resfriadas em um dessecador foram identificadas.

Devido à baixa condutividade que a argamassa possui foi necessário o aterramento dos fragmentos com fita metálica entre a superfície da amostra e o porta amostra seguido pelo processo de metalização. Nesse processo as superfícies foram recobertas com uma película de ouro e platina para que pudessem ser observadas ao MEV.

Com as superfícies metalizadas, o porta amostra foi inserido no MEV. As imagens foram obtidas utilizando o detector de elétrons secundários (SE) e a microanálise de algumas amostras em regiões específicas foram obtidas utilizando-se o espectrômetro por energia dispersiva de raios-X (EDS). O microscópio utilizado é da marca Carl Zeiss modelo EVO 40 instalado no Laboratório de Caracterização de Superfícies da UFES.

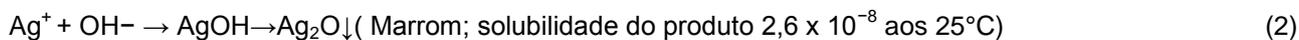
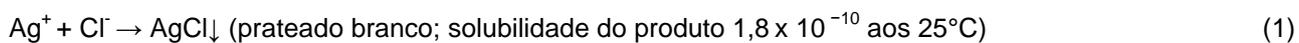
As amostras extraídas dos corpos de prova de concreto do ensaio de compressão axial aos 28 dias eram coletadas aleatoriamente e moídas por 10 segundo em um moinho de discos e levadas para a análise das fases mineralógicas por DRX. O objetivo dessa análise era verificar se houve a formação de algum mineral distinto após a interação com o cascalho de perfuração.

3.4.3.4 Detecção de cloretos

O método colorimétrico do nitrato de prata, AgNO_3 , é um método rápido e fácil para medir a profundidade de penetração de cloreto livre em materiais a base de cimento. Neste método, uma solução de AgNO_3 (normalmente 0,1 mol/L) é pulverizada sobre superfície recentemente fraturada de materiais a base de cimento. A área que contém alta concentração de cloreto se torna prateado branco devido à formação de AgCl derivado da reação entre Ag^+ e Cl^- . A área que contém baixa concentração de cloreto ou não contém cloreto se transforma em marrom devido à formação de Ag_2O das reações entre Ag^+ e OH^- (FUQIANG *et al.*, 2011).

Existe principalmente Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- , Cl^- e SO_4^{2-} nos poros das soluções de materiais de cimento hidratado expostas ao cloreto. Entre eles OH^- , Cl^- e SO_4^{2-} podem reagir com

Ag^+ quando solução de AgNO_3 é pulverizada sobre as superfícies recém fraturadas desses materiais (FUQIANG *et al.*, 2011). As reações podem ser expressas como segue:



Como o alto teor de cloretos nos cascalhos de perfuração é citado por diversos autores (AL-ANSARY, AL-TABBAA, 2007; PIRES, 2009; MEDEIROS, 2010), essa análise colorimétrica funcionou como indicativo para a presença de cloretos nos concretos com substituição e adição de cascalhos.

O método colorimétrico com AgNO_3 pode detectar cloreto livres em materiais à base de cimento em idades recentes. Porém nesta pesquisa optamos por realizar este experimento aos 28 dias entendendo que a hidratação do cimento pode favorecer a redução de cloretos livres.

As amostras de concreto, após serem submetidas ao ensaio de tração por compressão diametral, eram colocadas sobre um bancada e a solução de AgNO_3 (0,1 mol/L) era aspergida sobre as amostras até que estivessem completamente molhadas. Foram feitos registros fotográficos nos tempos de 15, 60 e 120 minutos.

3.4.4 Análise estatística

Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, por meio da análise de variância (ANOVA). Esta técnica permite comparar grupos de observações, pela comparação da variabilidade das médias entre os grupos e a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI; RIBEIRO, 1992).

O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta analisada é determinado por um teste de comparação entre valores calculados (F calculado) e os tabelados (F tabelado) de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer. Os valores F tabelados são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o F calculado for maior do que o F tabelado. O nível de significância adotado nas análises foi de 5%, que é um nível comumente utilizado na área de engenharia civil.

Capítulo 4

Não menos que saber, apraz-me duvidar.

Dante Alighieri

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Estes resultados estão ordenados e agrupados de forma a facilitar a leitura e compreensão. Inicialmente são abordados os resultados relativos à caracterização dos cascalhos da fase I e III, dos concretos com substituição de areia pelo CAP I e dos concretos com adição do CAP III, tanto no estado fresco, quanto endurecido, compreendendo os ensaios de índice de consistência, massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão, propriedades microestruturais e detecção de cloretos. Os resultados destes ensaios foram submetidos à análise estatística e discutidos.

4.1 Caracterização dos cascalhos

As amostras dos cascalhos de perfuração foram submetidas a alguns ensaios a fim de caracterizá-las quanto a sua composição química, características físicas, mineralógicas e microestruturais.

4.1.1 Caracterização química

A caracterização química foi realizada por ensaios de determinação do pH, perda ao fogo, composição química, através de ensaios de fluorescência induzida por raios-X e espectroscopia no infra vermelho.

A Tabela 4.1 demonstra os resultados obtidos nas medições do pH das amostras de CAP I e CAP III.

Tabela 4.1 – Valores de pH

Material	pH (cascalho/H ₂ O)
CAP I	8,47
CAP III	9,31

Fonte: Acervo Pessoal

De acordo com a EMBRAPA (1997), os resultados descritos na Tabela 4.1 mostram que os dois tipos de cascalho de perfuração são alcalinos, sendo o CAP III alcalino. Esses valores favorecem o uso dos cascalhos em concretos que necessitam manter seu pH alcalino afim de evitar a descalcificação do cimento hidratado que conduz à desagregação (PRISZKULNIK, 2011).

A composição química total dos materiais foi determinada por meio da análise quantitativa por FRX e está apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Composição química quantitativa

Óxidos	Teores (%)	
	CAP I (b)	CAP III (b)
SiO ₂	80,55	9,13
Al ₂ O ₃	12,45	2,36
K ₂ O	4,3	1,50
CaO	1,28	52,25
Fe ₂ O ₃	0,79	1,04
SO ₃	0,37	0,16
MgO	N.E.	1,19
TiO ₂	0,20	N.E.
SrO	0,02	0,04
P.F.	0,04	32,33

Nota: (a) N.E. – Não encontrado; (b) – diferentes fases da perfuração.

Fonte: Acervo pessoal.

No CAP I foi possível identificar a presença majoritária, expressa nos óxidos de silício, alumínio, potássio, cálcio e ferro. Pela Tabela 4.2 é possível observar que os cascalhos têm sua composição química bem distinta. O CAP I contém maior teor de sílica e o CAP III maior teor de cálcio.

De acordo com Santos (1992) o CAP I apresenta comportamento refratário, pois o somatório dos teores de dióxido de silício e do óxido de alumínio (SiO₂ + Al₂O₃) é superior a 70%. Sua utilização em materiais cerâmicos foi investigada por Pires (2009).

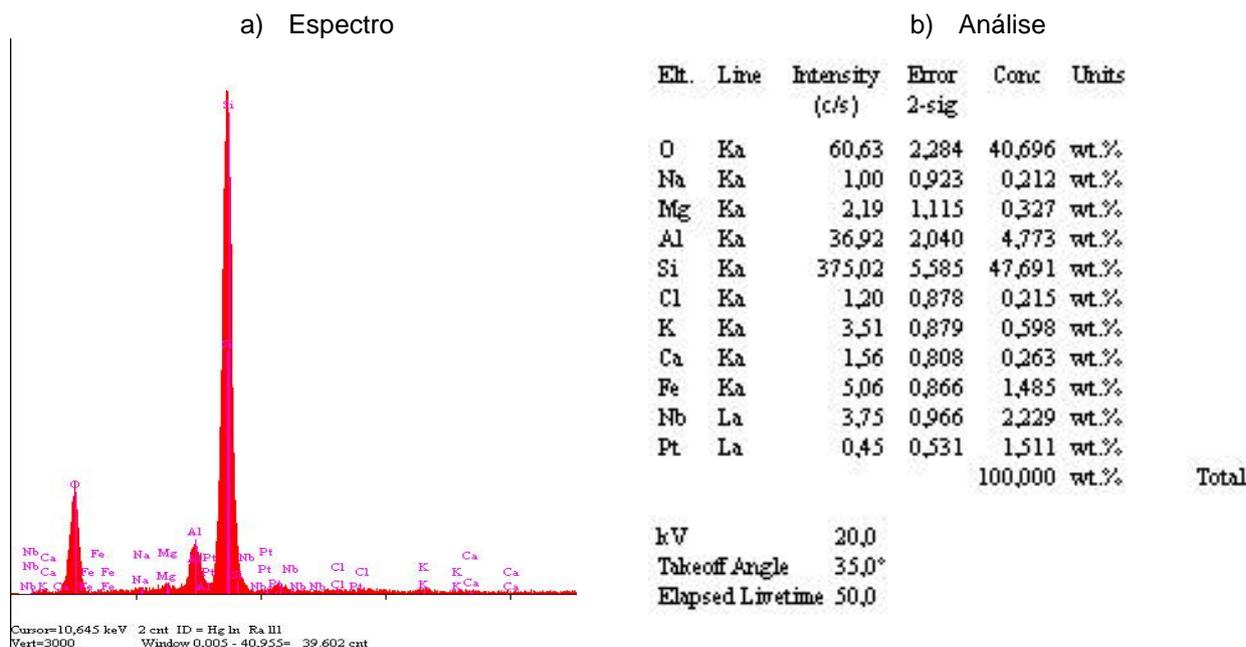
O cálcio, elemento predominante na amostra de CAP III, explica a perda ao fogo de 32,33%, devido principalmente à eliminação do dióxido de oxigênio (CO₂) proveniente do carbonato de origem; e também das águas intercaladas de coordenação e zeolítica, a água de hidroxilas dos argilominerais e também de hidróxidos existentes como hidróxido

84 Apresentação e discussão dos resultados

de alumínio e ferro ($\text{Al}(\text{OH})_3$; $\text{Fe}(\text{OH})_3$). Todavia, os componentes voláteis do carbonato estão incluídos nesta determinação (SANTOS, 1992).

A combinação das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia de raios X por energia dispersiva (MEV/EDS) permitiram a identificação e quantificação de elementos nas fases presentes nos materiais analisados e a identificação de elementos não identificados por FRX (Figura 4.1).

Figura 4.1- Análise por MEV/EDS CAP I



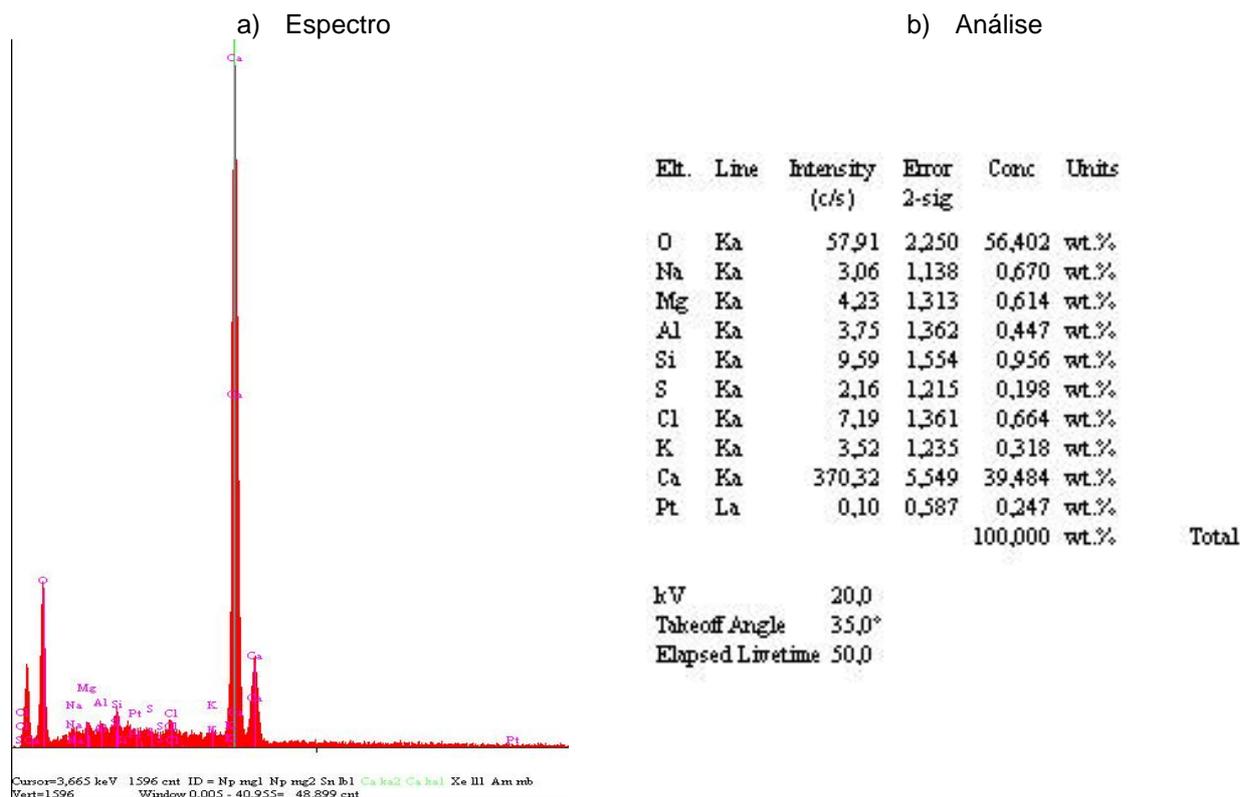
Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados das técnicas de FRX e MEV/EDS forneceram resultados similares dos componentes majoritários do CAP I, ou seja, predominância de silício. A identificação de nióbio na amostra pode ser referida à interferência espectral ou má interpretação da linha. Já o elemento cloro foi detectado apenas na EDS por limitação do método FRX utilizado, em que somente elementos entre Na (11) e U (92) são analisados. Pode conter cloreto de sódio em pequena concentração. Já o titânio e o estrôncio só foram detectados por FRX. Esses podem estar abaixo do limite de detecção do EDS de 1 ppm (partes por milhão).

A análise do CAP I por EDS identificou a presença intensa de silício seguido pelos elementos oxigênio, alumínio, ferro, potássio, magnésio, cálcio, cloro e sódio. A platina foi o elemento utilizado na metalização da amostra.

A Figura 4.2 apresenta o espectro e resultado da análise da avaliação do CAP III por MEV/EDS.

Figura 4.2 - Análise por MEV/EDS CAP III

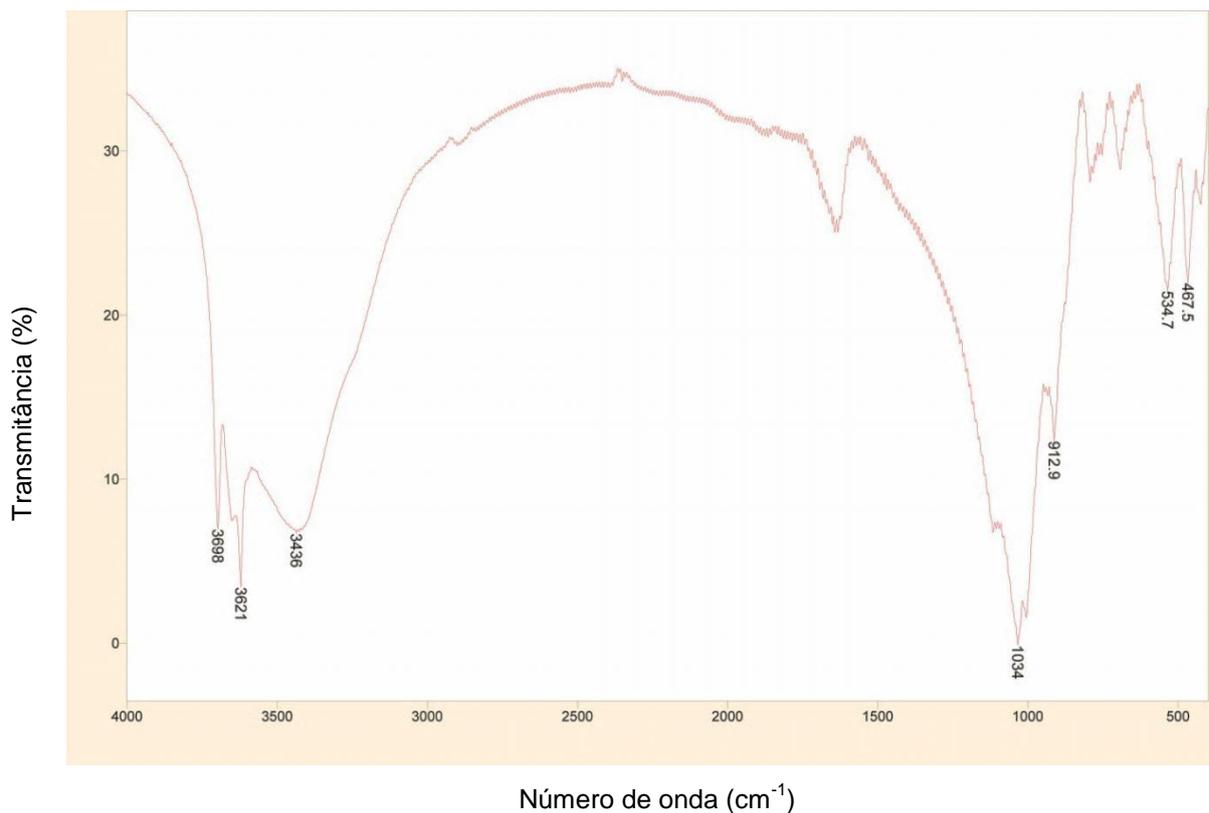


Fonte: Acervo pessoal.

Os elementos predominantes na amostra de CAP III são cálcio, oxigênio, silício e cloro. Também foram detectados magnésio, potássio, alumínio, sódio e enxofre. A platina é proveniente da metalização da amostra. As quantificações estão proporcionais nas duas técnicas. O sódio somente foi encontrado no CAP III por EDS devido ao limite de detecção do ensaio por FRX.

A análise de espectroscopia no infravermelho foi realizada somente no CAP I e seu espectro está apresentado na Figura 4.3. As bandas presentes em 3436, 3621 e 3698 cm^{-1} correspondem aos estiramentos OH, indicando a presença de água. Esta água pode estar aprisionada entre as lamelas dos argilominerais. Em 467,5 e 534,7 cm^{-1} , as bandas estão associadas a deformações de SiO, enquanto as bandas em 912,9 e 1034 cm^{-1} são estiramento de SiO. Todas essas vibrações são características principalmente do mineral quartzo.

Figura 4.3 – Espectro no InfraVermelho do CAP I



Fonte: Acervo pessoal.

Sequencialmente às caracterizações químicas nos cascalhos foram realizadas as técnicas para caracterização física e mineralógica.

4.1.2 Caracterização física e mineralógica

A caracterização física dos cascalhos foi realizada através dos ensaios de determinação da composição granulométrica, massa específica, massa unitária, volume de vazios, teor de absorção, material pulverulento, termogravimetria, calorimetria diferencial exploratória, análise de imagem por microscopia ótica e eletrônica de varredura, limites de Atterberg e análise de forma do grão. Também realizou-se a caracterização mineralógica por difração de raios-X e análise petrográfica.

A determinação da composição granulométrica, massa específica e massa unitária foram apresentadas no capítulo 3, na Tabela 3.6. A distribuição granulométrica do CAP I está contida nos limites de agregados miúdos para o concreto segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), com dimensão máxima característica de 1,18 mm e módulo de finura de 1,65. Sua substituição por areia F (areia fina) na dosagem do concreto foi possível sem necessidade de compensação de volumes devido às similaridades das massas específicas. O CAP I apresenta valores considerados normais para agregado miúdo quanto à distribuição granulométrica, ao módulo de finura e a dimensão máxima característica determinados.

Apesar de possuírem dimensão máxima característica e módulo de finura com valores próximos, o CAP III contém 68,5% de material pulverulento (peneiramento via úmida) contra apenas 0,01% do CAP I. No CAP I o teor de material passante (peneiramento via seca) na peneira 100 # foi de 13%. Essa massa da porção passante foi analisada por difração à laser para os dois tipos de CAP e observou-se que, no CAP I, 4% da amostra integral contém silte como demonstra a Figura 3.7. Frações de argila ($< 2 \mu\text{m}$) não foram detectadas no CAP I. Já no CAP III cerca de 30% da amostra é menor que $2 \mu\text{m}$.

Pires (2009) e Medeiros (2010) encontraram cascalhos de perfuração com menor fração de areia e maior de silte e argila. Esse fato é devido ao procedimento de coleta das amostras avaliadas, pois esses autores coletaram seus resíduos em diques e aterros, portanto com cascalhos provenientes das três fases da perfuração misturadas. Além de terem sido coletados em regiões diferentes.

O teor de absorção de água do CAP III é o dobro do teor encontrado no CAP I, devido a sua maior superfície específica e litologia da rocha de origem. O volume de vazios é praticamente o mesmo. Como os cascalhos são originados da mistura de rochas de diferentes origens, suas massas específicas também diferem. Os cascalhos são bastante distintos também visualmente (Figura 4.4 à Figura 4.8).

Figura 4.4 - Imagem do CAP I, moído. Sem aumento.



Figura 4.5 - Microscopia Ótica CAP I - Ampliação 30x

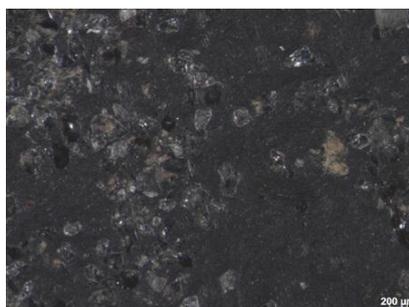
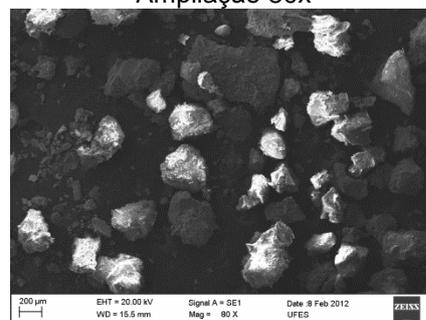


Figura 4.6 – MEV(elétrons secundários) CAP I – Ampliação 80x



Fonte: Acervo pessoal.

O grande percentual de silício no CAP I é proveniente do quartzo identificado no difratograma de raios-X (Figura 4.9) e também identificado por análise petrográfica.

O CAP III é mais fino que o CAP I. Isto pode ser explicado pela diferença entre as durezas das rochas perfuradas.

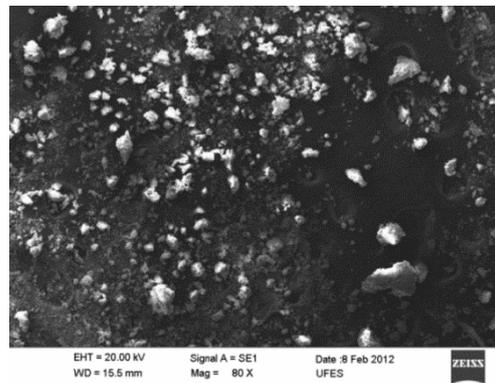
88 Apresentação e discussão dos resultados

Na escala de Mohs¹⁰ o CAP III tem uma menor dureza, 3, e para o CAP I uma maior dureza, 7. Além disso, a broca utilizada na primeira fase possui dente de aço, que raspa a formação rochosa e a broca de inserto, usada na terceira fase da perfuração, esmaga a rocha. Portanto, o CAP III apresenta menores dimensões.

Figura 4.7- Imagem do cascalho III, moído.



Figura 4.8 – MEV(elétrons secundários) CAP III
Ampliação 80x

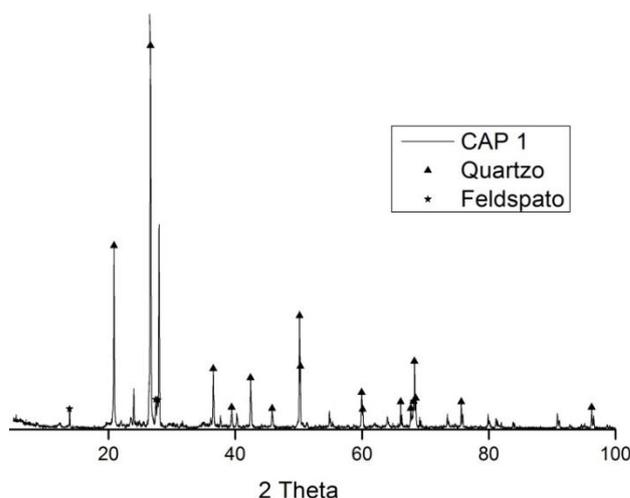


Fonte: Acervo pessoal.

A presença de argilominerais não foi detectada no CAP I por difração de raios X, porém recomendam-se análises mais detalhadas que incluam preparação de lâminas orientadas, aquecidas e glicoladas, para constatação efetiva da presença destes (ALBERS *et al.*, 2002). O difratograma apresentado na Figura 4.9 demonstra que foi encontrado predominantemente no CAP I o mineral quartzo, além do feldspato(albita e microclínio).

¹⁰ Escala de Mohs: é uma escala relativa de dureza desenvolvida em 1812 pelo mineralogista alemão Frederich Mohs (1773-1839).

Figura 4.9 - Difratoograma do CAP I



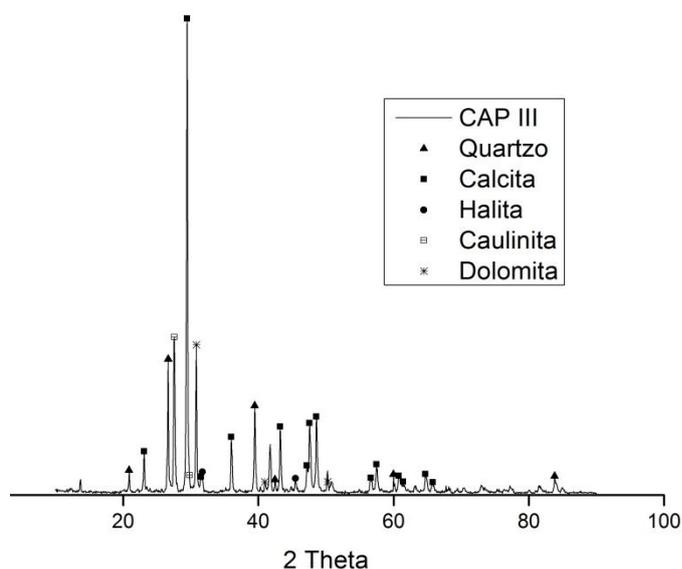
Fonte: Acervo pessoal.

A análise petrográfica do CAP I complementou a difração de raios-X (Figura 4.9) e foram identificadas predominância de quartzo em diversas frações granulométricas, os minerais turmalina preta (afrizite), mica (muscovita) e frações de feldspato. A rocha perfurada pertence à formação Rio Doce (de 0m a 793m) da bacia sedimentar do Espírito Santo que possui os minerais: arenito hialino, grosseiro, subangular, quartzoso, feldspático, granatífero, desagregado; argilito verde-claro, de mole a semiduro e calcarenito creme-claro, bioclástico, micrítico, maciço, compacto (ANP, 2006).

Devido à sua granulometria, o CAP III não apresentou condições para análise petrográfica.

Por meio das difrações de raios X foram encontrados na amostra de CAP III os minerais calcita, dolomita, halita, caulinita e quartzo. Sendo a calcita o mineral com maior intensidade e a halita como contaminante proveniente do fluido de perfuração. A rocha perfurada pertence provavelmente à formação Regência, pois esta contém basicamente carbonatos. A Figura 4.10 apresenta o difratograma de raios X do CAP III.

Figura 4.10– Difratoograma do CAP III

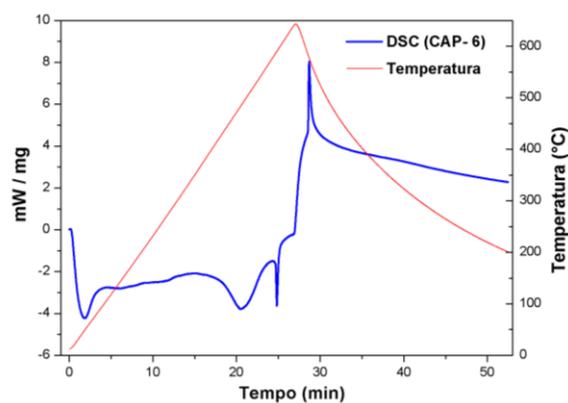
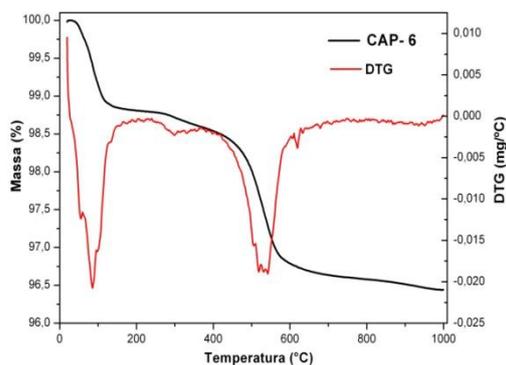


Fonte: Acervo pessoal.

A curva da TG do CAP I (Figura 4.11) indica uma perda de massa de apenas 4% que pode ser justificada por perda de água. Esse resultado também pode ser ratificado com o ensaio de perda ao fogo expresso na Tabela 4.2. Esse material pode então ser considerado inorgânico e não possui contaminantes orgânicos.

Figura 4.11 – Análise termogravimétrica do CAP I

Figura 4.12– Calorimetria diferencial exploratória do CAP I



Fonte: Acervo pessoal.

O DSC (Figura 4.12) indica a perda de água no primeiro pico endotérmico largo e o segundo pico endotérmico agudo significa que o quartzo passou do seu estado cristalino alfa para beta aos 573°C (SANTOS, 1992). Confirmando mais uma vez a presença majoritária desse mineral.

Os limites de Atterberg só puderam ser determinados no CAP III, pois o CAP I apresentou-se como não plástico. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Limites de Atterberg do CAP III

Limites de Atterberg		
Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Índice de Plasticidade
16%	7%	9%

O material avaliado pode ser caracterizado como uma argila pouco plástica segundo seu índice de plasticidade e seu limite de liquidez do Sistema Unificado de Classificação de Solos publicado pela ASTM (1990).

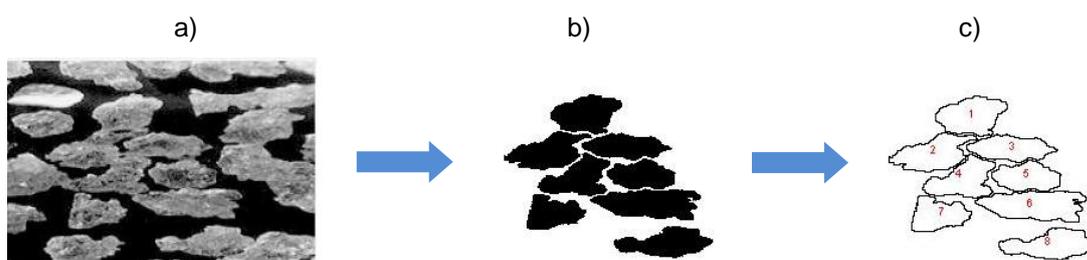
O CAP III é composto por 30% de areia, 40% de silte e 30% de uma argila pouco plástica segundo as caracterizações já descritas neste capítulo..

Ressaltando que a forma do grão influencia no desempenho das argamassas e concretos, avaliou-se o CAP I quanto a sua forma do grão utilizando a técnica de caracterização por imagem já descrita no capítulo 3 no item 3.2 e em Fialho *et al.* (2012).

Os primeiros resultados foram de obtenção dos parâmetros para classificação quanto à forma dos grãos da norma NBR 7389-1 (ABNT, 2009). Os resultados estão apresentados nas Figuras 4.13 e Figura 4.14.

As análises estatísticas, para esses resultados, estão apresentadas no Apêndice A desta dissertação nas Figuras A.1.1.1 à A.1.1.3.

Figura 4.13 – Grão anguloso – esfericidade baixa

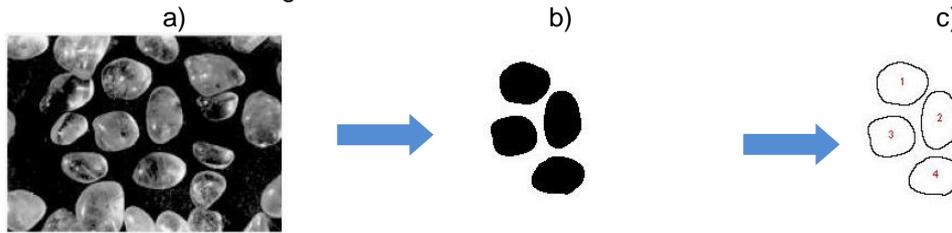


Nota: a) Imagem da NBR 7389-1 (Grão com Grau de esfericidade baixa, anguloso); b) Imagem binarizada pelo programa ImageJ; c)- Contorno e numeração gerados pelo programa.

Fonte: Acervo pessoal

Esse mesmo procedimento foi realizado para os grãos subangulosos e subarredondados de esfericidade alta e baixa. Os dados numéricos obtidos pelo programa ImageJ estão inseridos na Tabela 4.4. A quantidade de grãos analisados foi variada devido à qualidade da imagem retirada da norma. Para avaliação de um maior número de grãos esses deveriam estar mais afastados, pois o programa identifica cada grão por meio do seu contorno.

Figura 4.14 - Grão arredondado – esfericidade alta



Nota: a) Imagem da NBR 7389-1 (Grão com Grau de esfericidade alto, arredondado); b) - Imagem binarizada pelo programa ImageJ; c)- Contorno e numeração gerados pelo programa.

Fonte: Acervo pessoal

Os dados obtidos por meio das análises das imagens da norma permitiram a distinção das classes numericamente, minimizando o erro de classificação visual. Esses dados foram dispostos na Tabela 4.4. Essa classificação é uma sugestão para o estudo da forma do grão afim de melhor padronização das análises.

Os parâmetros escolhidos para a análise de imagem foram área, perímetro, maior diâmetro de Ferret e menor diâmetro de Ferret. A partir desses dados foram calculados a circularidade dada pela equação 4 e a relação entre os diâmetros de Ferret.

$$Circularidade = \frac{4\pi A}{p^2} \tag{4}$$

Onde: A= área; p = perímetro.

A circularidade avalia o grau de arredondamento do grão enquanto a razão entre o maior diâmetro de Ferret e o menor diâmetro de Ferret avalia o grau de esfericidade. Os valores da Tabela 4.4 são a média aritmética dos valores individuais de cada grão.

Tabela 4.4 – Caracterização dos grãos

Classificação NBR 7389-1	Quantidade de Grãos analisados	Circularidade ($4\pi A/p^2$)	[Maior Diâmetro de Ferret ¹¹] / [Menor D. de Ferret]
GE alta - arredondado	4	0,876	1,370
GE alta - Subarredondado	3	0,810	1,463
GE alta - Subanguloso	5	0,720	1,585
GE alta - Anguloso	12	0,685	1,484
GE Baixa - Arredondado	4	0,612	2,732
GE Baixa - Subarredondado	4	0,615	2,334
GE Baixa - Subanguloso	3	0,564	2,568
GE Baixa - Anguloso	8	0,489	2,496

Fonte: Acervo pessoal

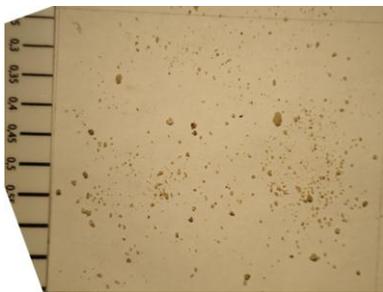
¹¹ Diâmetro de Ferret - Diâmetro entre duas tangentes em lados opostos da partícula.

Com os parâmetros previamente definidos foram feitos alguns testes para obtenção de imagens do CAP I para classificação do mesmo. Ressaltando que esse método ainda não é normatizado e serviu apenas de indicativo numérico para a determinação da forma do grão do CAP I.

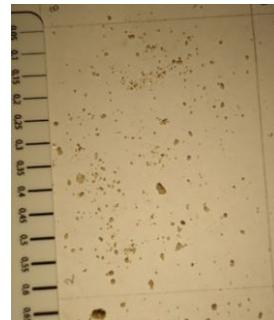
A altura de queda para o espalhamento dos grãos foi padronizada, assim como a posição e intensidade da fonte luminosa. A sombra causada pelos grãos poderia ser reconhecida pelo programa como um grão e por isso foram tomadas essas precauções. Algumas imagens do CAP I estão na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Imagem do CAP I

a) Imagem CAP I com iluminação artificial



b) Imagem CAP I com iluminação artificial



Fonte: Acervo pessoal

As imagens da Figura 4.15 foram tratadas e analisadas no programa ImageJ. Alguns grãos foram excluídos da imagem binarizada para facilitar o reconhecimento da borda e do perímetro de cada grão. Um exemplo de uma imagem tratada e analisada está apresentada na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Análise de imagem do CAP I

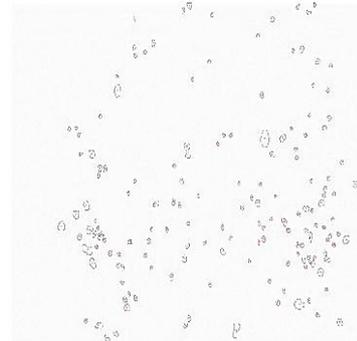
a) Fotografia do CAP I



b) Imagem binarizada pelo programa ImageJ



c) Contorno e numeração gerados pelo programa.



Fonte: Acervo pessoal

As imagens da Figura 4.16, após binarização e tratamento, geraram resultados que foram comparados com os grupos apresentados na Tabela 4.4. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 4.5.

94 Apresentação e discussão dos resultados

Tabela 4.5 - Resultados da figura 4.16

Quantidade de Grão analisados	Circularidade ($4\pi A/P^2$)	[Maior Diâmetro de Ferret] / [Menor D. de Ferret]
155	0,827	1,427

Fonte: Acervo pessoal

Por esse método o CAP I pode ser classificado com grau de esfericidade alta e seu grau de arredondamento como subarredondado. Vale ressaltar que a forma do grão quanto mais próximo de uma esfera, melhor é a trabalhabilidade das argamassas e concretos.

4.2 Concretos com substituição do cascalho de perfuração da primeira fase – CAP I

Nesta etapa da pesquisa foram avaliadas as propriedades dos concretos com substituição do cascalho da primeira fase da perfuração. Os percentuais testados foram de 20%, 50% e 100% em relação à massa de areia fina. Os resultados estão apresentados e discutidos a seguir. Serão apresentados valores médios e os resultados dos ensaios individuais são apresentados no apêndice B.

4.2.1 Estado fresco

Conhecer o comportamento do concreto no estado plástico é muito importante. Para se obter concretos endurecidos de boa qualidade, é necessário que ele seja tratado cuidadosamente na fase plástica, uma vez que as deficiências geradas nesta fase resultarão em prejuízos ao longo da vida útil da peça fabricada, comprometendo a sua durabilidade.

Os concretos no estado fresco foram caracterizados por meio das determinações do índice de consistência, massa específica e moldados em corpos de prova cilíndricos.

4.2.1.1 Índice de consistência e massa específica

Os resultados médios desta caracterização estão apresentados na Tabela 4.6. Como dito anteriormente, todos os concretos estudados tiveram sua relação água/cimento igual a 0,53.

Tabela 4.6 - Estado fresco, CAP I

Concretos	Índice de consistência (mm)	Massa específica (kg/dm ³)	Aditivo (%)
CR	75	2,35	0,07
S20	60	2,38	0,27
S50	60	2,33	0,82
S100	20	2,27	0,82

Fonte: Acervo pessoal

NOTA: CR – referência; S20 - 20% substituição de areia; S50 - 50% substituição de areia; S100 - 100% substituição de areia.

O índice de consistência (Tabela 4.6) indica que a substituição da areia por cascalho de perfuração altera a trabalhabilidade. Quanto maior a quantidade substituída, maior o travamento do concreto, mesmo com o incremento do aditivo. Este comportamento pode ser explicado por alguns motivos, dentre eles: (a) composição do fluido de perfuração que pode conter espessantes, como a goma xantana¹² e argilominerais; (b) presença de mica que por seu formato lamelar modifica o fluxo e (c) o menor módulo de finura que aumenta a superfície específica e, por consequência, demanda mais água. As condições reológicas do concreto com adição dos cascalhos continuarão a ser estudadas.

A massa específica entre os concretos não apresentou diferenças, com tendência de queda com a substituição do CAP I. Porém, continua sendo classificado como normal (2000 a 2800 Kg/m³) (HELENE; ANDRADE, 2007).

4.2.2 Estado endurecido

No estado endurecido os concretos com CAP I foram ensaiados para se verificar a resistência à compressão axial, a tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade. Além disso, foram realizados ensaios de absorção de água e avaliação das propriedades microestruturais por meio de MEV e DRX. Os resultados obtidos nesses ensaios, bem como as análises estatísticas realizadas, são apresentados e discutidos a seguir.

4.2.2.1 Resistência à compressão axial

Resistência é a medida da quantidade de tensão necessária para que o material atinja a ruptura. É uma propriedade normalmente especificada no projeto e controle de qualidade do concreto, porque, comparado aos ensaios envolvendo outras propriedades, o ensaio de resistência é relativamente fácil e outras propriedades podem ser deduzidas a partir dos dados desse ensaio. A resistência à compressão do concreto é muitas vezes maior do que outros tipos de resistência (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os concretos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os resultados médios e o percentual do coeficiente de variação de cada teste estão apresentados na Tabela 4.7. Os resultados individuais dos ensaios de resistência à compressão axial, desvio padrão e coeficiente de variação estão apresentados no Apêndice B.2 desta dissertação.

¹² Goma xantana é um polissacarídeo que modifica as propriedades reológicas formando soluções viscosas e géis hidrossolúveis.

96 Apresentação e discussão dos resultados

Tabela 4.7 – Resistência à compressão axial – CAP I

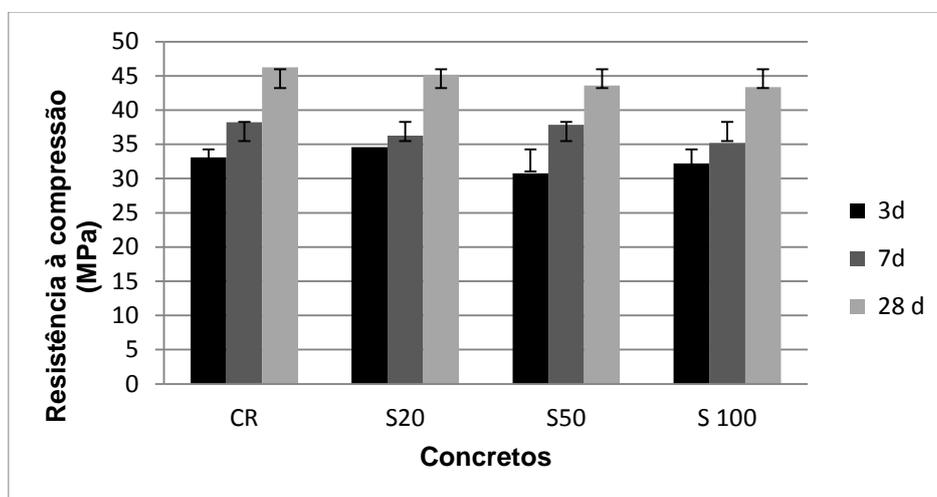
CONCRETOS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) 3 dias	CV (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) 7 dias	CV (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) 28 dias	CV (%)
CR	33,11	0,07	38,23	0,02	46,25	0,02
S20	34,57	0,06	36,27	0,05	45,19	0,03
S50	30,75	0,03	37,84	0,01	43,57	0,02
S100	32,19	0,02	35,21	0,03	43,34	0,03

NOTA: CR – referência; S20 - 20% substituição de areia; S50 - 50% substituição de areia; S100 - 100% substituição de areia. CV(%) – percentual do coeficiente de variação.

Fonte: Acervo pessoal

A Figura 4.17 representa os resultados médios de resistência à compressão axial dos concretos estudados para melhor visualização.

Figura 4.17 – Resistência à compressão axial – Concretos com substituição de CAP I



NOTA: CR – referência; S20 - 20% substituição de areia; S50 - 50% substituição de areia; S100 - 100% substituição de areia.

Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), com o auxílio do programa *Statistica 7.0* (STATSOFT, 2004), cujos resultados estão resumidos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Análise de variância da resistência à compressão com o percentual de substituição do CAP I, idade e interação

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% Substituição CAP I	79,4	3	26,5	15,48	2,76	0,000000	S
Idade	1649,3	2	824,7	482,50	3,15	0,000000	S
% Substituição CAP I *Idade	88,9	6	14,8	8,67	2,25	0,000001	S
Erro	102,6	60	1,7				

Fonte: Acervo pessoal.

SQ: Soma Quadrática. GL: Graus de liberdade. MQ: Média Quadrática. Fcal: Valor calculado de F. F tab: Valor tabelado de F.

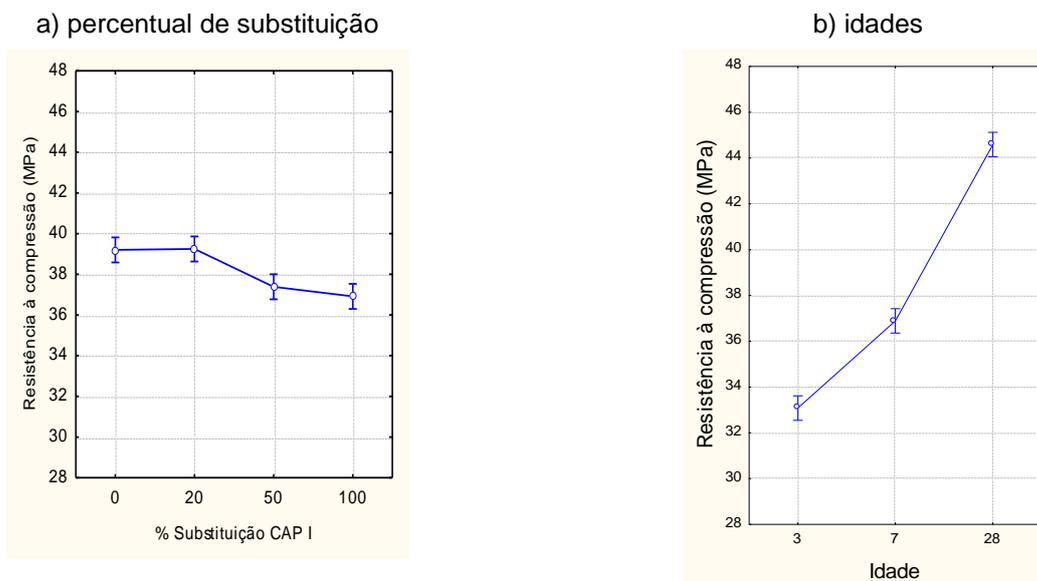
A análise estatística mostrou que o percentual de substituição de CAP I, a idade e a interação entre essas duas variáveis são significativas, já que o valor de F_{cal} de cada variável é maior que o F_{tab} correspondente.

A análise de variância mostrou que os efeitos individuais dos fatores analisados, o percentual de substituição de CAP I e idade, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Isto quer dizer que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exerce influência na resistência à compressão. Também pode ser observado, através da análise de variância, que o efeito da interação entre o percentual de substituição de CAP I e a idade possui efeito significativo.

Uma importante consideração sobre este aspecto diz respeito à intensidade de influência dos fatores. Neste sentido, tomando-se como base a magnitude dos valores de F_{cal} , pode-se constatar que a variável mais influente na resistência à compressão foi a idade, em segundo lugar apresentou-se o percentual de substituição CAP I e a variável de menor influência foi, porém ainda significativa, a interação entre a idade e o percentual de substituição CAP I

A Figura 4.18 mostra os gráficos do efeito do percentual de substituição e a idade sobre a resistência à compressão.

Figura 4.18 – Efeito do percentual de substituição e a idade sobre a resistência à compressão – CAP I



Fonte: Acervo pessoal.

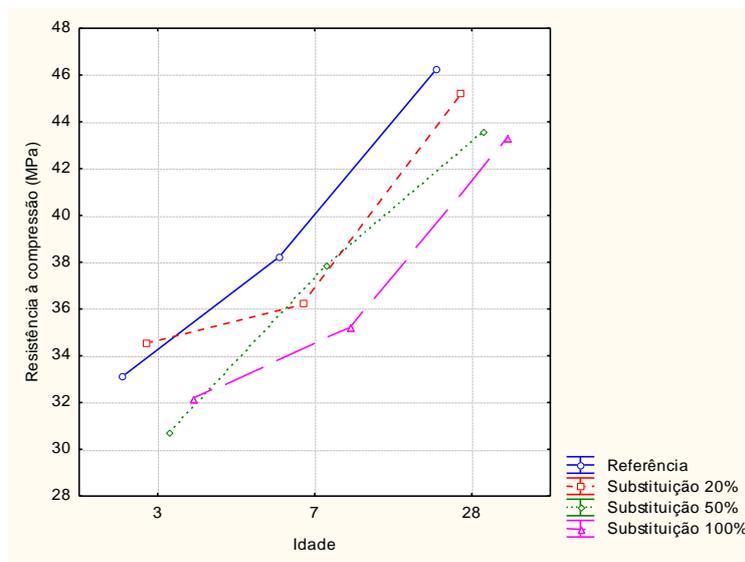
A Figura 4.18a mostra que à medida que o percentual de substituição aumenta a resistência à compressão demonstra tendência à redução.

98 Apresentação e discussão dos resultados

A Figura 4.18b demonstra claramente a tendência de crescimento da resistência com o aumento da idade, ressaltando-se que os incrementos de resistência até os 28 dias são consideráveis. Este comportamento é similar ao encontrado por tantos outros pesquisadores que estudaram concretos convencionais, dentre eles Neville (1997), Metha e Monteiro (2008), Andrade e Tutikian (2011).

A Figura 4.19 mostra a variável menos influente que foi a interação da idade com o percentual de substituição sobre a resistência à compressão.

Figura 4.19 – Efeito da interação entre os fatores idade e o percentual de substituição sobre a resistência à compressão



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados deste programa experimental corroboram com os obtidos em outras pesquisas de investigação das técnicas de encapsulamento dos cascalhos (AL-ANSARY, AL-TABBAA, 2007; LEONARD; STEGEMANN, 2010). A alta resistência à compressão pode não ser necessária em alguns cenários de administração de resíduos, contudo é um excelente indicador do progresso das reações de hidratação do cimento. A leve redução na resistência dos concretos produzidos não se deve a componentes orgânicos, conforme caracterização apresentada no item 4.1. Porém, a dificuldade de moldagem para o traço S100, o maior volume de vazios devido a menor massa unitária do CAP I em relação à areia, podem explicar esse enfraquecimento. Os estudos de durabilidade devem continuar para investigar a possibilidade de expansão desses minerais na matriz dos concretos.

Essa série de observações sobre a resistência à compressão indicam várias possibilidades de uso dos cascalhos tratados termicamente (100°C). Blocos de pavimentação requerem resistências de 35 a 50 MPa e blocos de concreto para vedação de 2 a 10 MPa. Além de terem indicações para cobertura de aterros (AL-ANSARY, AL-

TABBAA, 2007). Estudos de dosagem precisam ser desenvolvidos para obtenção de traços que atendam as normas e sejam ambientalmente seguros e viáveis economicamente.

4.2.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

A razão entre as resistências à tração uniaxial e à compressão geralmente tem variação de 0,07 a 0,11. Esse menor valor em relação à resistência à compressão se deve à facilidade com que as fraturas podem se propagar sob tensão de tração. Apesar da resistência à compressão derivar os resultados de resistência à tração nem sempre esses se aplicam completamente devido à influência de fatores como: método de ensaio, qualidade do concreto, características dos agregados e aditivos ou adições (METHA; MONTEIRO, 2008). Portanto, foram avaliados os concretos com substituição de CAP I na idade de 28 dias (Figura 4.20) e os resultados analisados estatisticamente (Tabela 4.9).

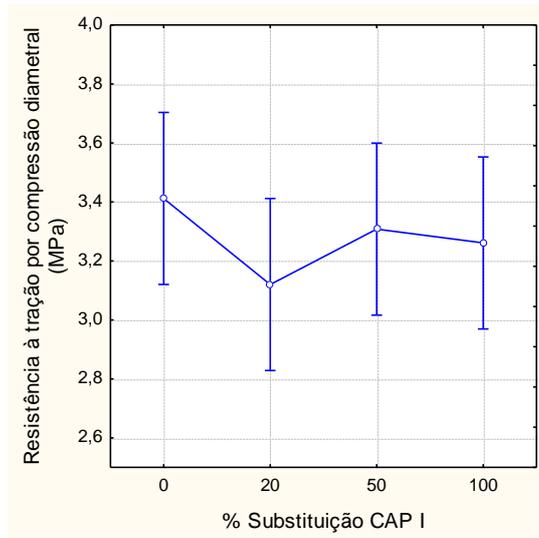
Tabela 4.9 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral com o percentual de substituição do CAP I

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% Substituição CAP I	0,2639	3	0,0880	0,750	3,10	0,535171	NS
Erro	2,3462	20	0,1173				

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.20 indica um leve decréscimo dessa propriedade nos concretos com CAP I (Tabela 3.1).

Figura 4.20 – Efeito do percentual de substituição de CAP I sobre a resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Acervo pessoal.

A análise estatística mostrou que o percentual de substituição de CAP I sobre a resistência à tração por compressão diametral não é significativo, já que o valor de F_{cal} para essa variável é menor que o F_{tab} .

Assim sendo, a substituição do CAP I não interferiu na propriedade de resistência à tração por compressão diametral. Porém deve-se considerar o decréscimo devido à elevada variabilidade do ensaio. Não foram encontrados estudos, até a presente data, que avaliaram essa propriedade em concretos com adição de cascalhos.

4.2.2.3 Módulo de elasticidade

As características elásticas de um material são uma medida de sua rigidez. Apesar do comportamento não-linear do concreto, é necessário estimar o módulo de elasticidade (relação ente a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional assumido) para serem determinadas as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais. Sabendo que o modulo de elasticidade pode ser afetado pelas características dos agregados, matriz da pasta de cimento, zona de transição e parâmetros de ensaio (METHA e MONTEIRO, 2008).

Os concretos produzidos com CAP I foram ensaiados para se verificar o módulo de elasticidade. Na Tabela 4.10 podem-se visualizar os resultados obtidos na análise de variância. A análise estatística mostrou que o percentual de substituição de CAP I sobre o módulo de elasticidade não é significativo, já que o valor de F_{cal} desta variável é menor que o F_{tab} .

Tabela 4.10 - Análise de variância do módulo de elasticidade com o percentual de substituição do CAP I

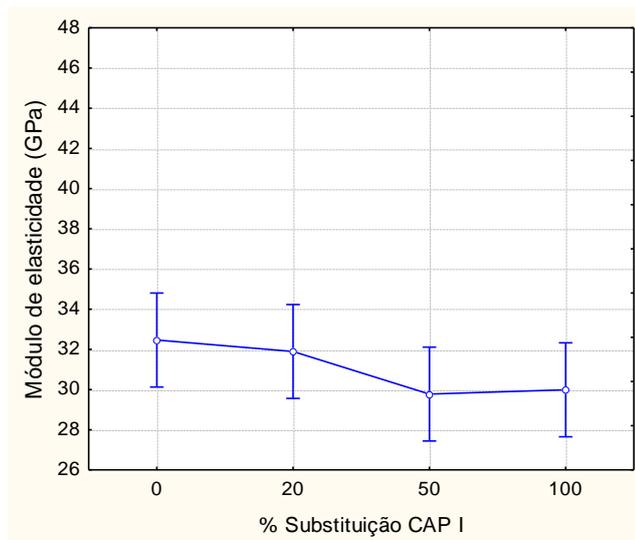
Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% Substituição CAP I	16,40	3	5,47	1,776	4,07	0,229400	NS
Erro	24,63	8	3,08				

SQ: Soma Quadrática. GL: Graus de liberdade. MQ: Média Quadrática. F_{cal} : Valor calculado de F. F_{tab} : Valor tabelado de F

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.21 indica um leve decréscimo dessa propriedade nos concretos com CAP I apesar da análise de variância considerar esse efeito não significativo.

Figura 4.21– Efeito do percentual de substituição do CAP I sobre o módulo de elasticidade



Fonte: Acervo pessoal.

Como pode ser visto a substituição do CAP I não interferiu na propriedade do módulo de elasticidade. Essa constatação pode ser atribuída à substituição da areia, de origem quartzosa, pelo CAP I que é originado majoritariamente por quartzo.

4.2.3 Durabilidade

4.2.3.1 Absorção de água

A água normalmente está presente em todo tipo de deterioração. A facilidade com que penetra nos sólidos porosos determina a sua taxa de deterioração.

No concreto, o papel da água tem de ser visto sob uma perspectiva adequada, uma vez que, como é um ingrediente necessário para as reações de hidratação do cimento e atua como agente facilitador da mistura dos componentes do concreto, a água está presente desde o início. Gradualmente, dependendo das condições ambientais e da espessura dos elementos do concreto, a maior parte da água evaporável é perdida, deixando os poros vazios ou não saturados. A re-saturação depende, em grande parte, da condutibilidade hidráulica conhecida como permeabilidade (METHA e MONTEIRO, 2008).

Para iniciar os estudos de durabilidade os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de absorção de água por imersão. Os resultados apresentados na Tabela 4.11 demonstram que o fator absorção de água é significativo.

Tabela 4.11 - Análise de variância da absorção de água com o percentual de substituição do CAP I

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% Substituição CAP I	3,8177	3	1,2726	13,289	3,10	0,000053	S
Erro	1,9153	20	0,0958				

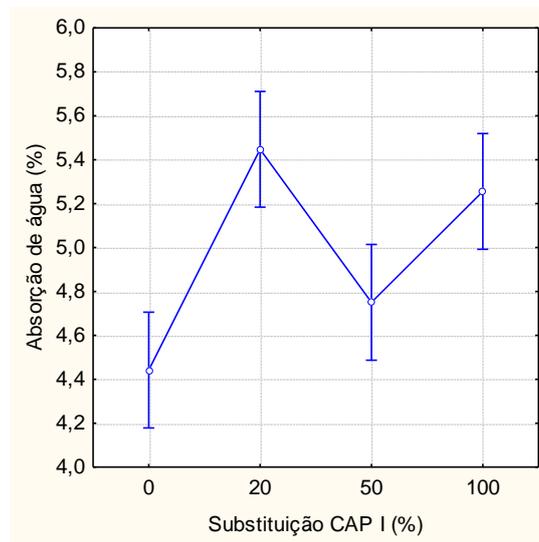
Fonte: Acervo pessoal.

O estudo de Opete *et al.*(2010) avalia a durabilidade apenas com a perda de peso durante o ciclo de molhagem e secagem realizado segundo a norma ASTM D 4843 (2009). O resultado não indica a perda de massa e os autores concluem que o concreto não sofreu com a ação da água.

Entretanto Jansen (1997) *apud* Opete *et al.*(2010) obteve resultados diferentes e justificou essa perda de massa em virtude da presença de argila presente no cascalho. Essa é, por conseguinte, a explicação para o aumento significativo da absorção de água nos concretos com substituição de CAP I.

Pelos resultados obtidos na absorção de água (Figura 4.22) observa-se que não ocorreu um maior empacotamento das partículas com o CAP I em relação à areia fina devida à forma subarredondada do CAP I.

Figura 4.22 – Efeito do percentual de substituição do CAP I sobre a absorção de água



Fonte: Acervo pessoal.

Após a avaliação das propriedades mecânicas, no qual todos os resultados atingiram aos objetivos estabelecidos neste estudo, foram avaliadas as propriedades microestruturais.

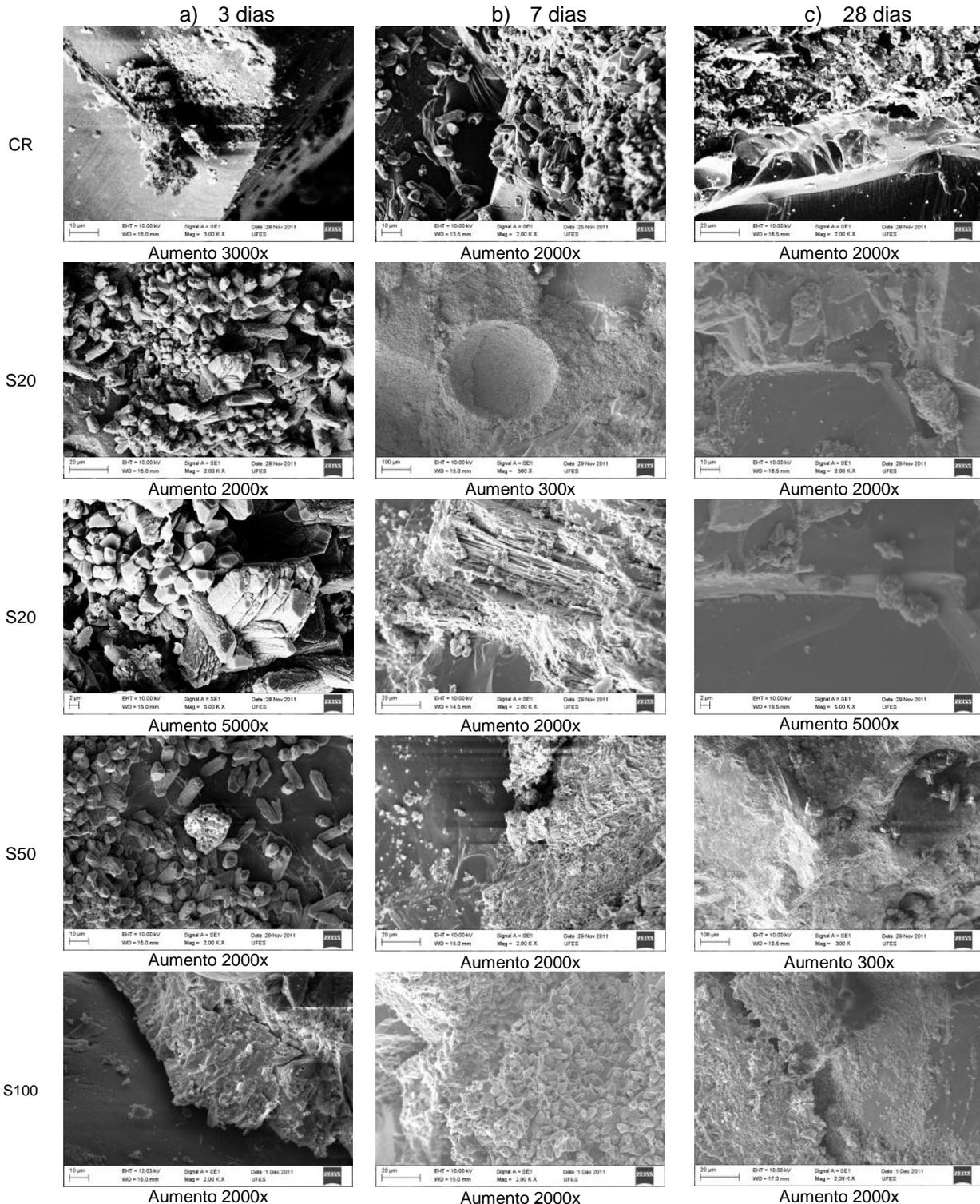
4.2.4 Propriedades Microestruturais

4.2.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microestrutura de um material, o tipo e distribuição das fases constituintes, tem uma ligação fundamental entre o processo de formação do material e suas propriedades (SCRIVENER *et al.* , 2004).

A Figura 4.23 apresenta típicas micrografias obtidas com a MEV das superfícies fraturadas dos concretos de controle e com substituição dos cascalhos nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Figura 4.23 - Micrografias dos concretos com CAP I em diferentes idades



Fonte: Acervo pessoal.

As micrografias mostram características gerais associadas com os produtos de hidratação do cimento. A ausência de etringita, cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio

hidratado semelhantes a agulhas, e de sulfoaluminato de cálcio hidratados mesmo nas primeiras idades foi constatada. As micrografias aos 3, 7 e 28 dias (Figura 4.23 a, b, c) mostram a evolução dos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado, semelhante a folhas e os largos cristais prismáticos hexagonais que podem ser típicos da portlandita (hidróxido de cálcio) e do aluminato de cálcio hidratado.

Pode também ser observado que os concretos apresentados são caracterizados por uma estrutura compacta. A estrutura dos poros dos três percentuais avaliados em relação à referência não apresenta mudanças morfológicas acentuadas. Isto pode sugerir que a presença do CAP I não influenciou negativamente na formação dos produtos de hidratação.

Os argilominerais também não puderam ser observados devido às dimensões micro ou nanométricas. Os microcristais da maioria dos argilominerais só podem ser visualizados por microscopia eletrônica de transmissão (MET); apenas alguns podem ser observados por MEV (COELHO *et al.*, 2007).

Embora a análise estatística do teste de resistência à compressão (Tabela 4.7) indique uma redução entre os grupos, as análises microestruturais não demonstram visíveis diferenças entre as amostras analisadas.

As análises químicas por meio do EDS demonstraram que os concretos com CAP I não modificaram os teores de cálcio e silício, o que significa que reações pozolânicas não aconteceram. Esse efeito já esperado devido à ausência de sílica livre e à granulometria do resíduo (TAYLOR, 1964). Os resultados de resistência à compressão axial confirmam essas detecções.

As análises microestruturais oferecem valiosas informações sobre a morfologia e o comportamento geral das misturas, mas não podem ser avaliadas isoladamente. Por isso foram realizados os testes de DRX para contribuir com os resultados já apresentados e discutidos neste estudo.

Essas e as demais micrografias feitas nos concretos podem ser visualizadas na íntegra no Apêndice B.6 nas Figuras B.6.1 à B.12 para o concreto referência e no Apêndice B.7 nas Figuras B.7.1 à B.7.44 para os concretos com CAP I.

4.2.4.2 Difração de raios X (DRX)

O objetivo da análise dos concretos por DRX é a detecção de fases mineralógicas que possam ter sido modificadas em virtude da substituição de areia por CAP I. Há dois

fatores limitantes da técnica: identificam-se apenas os compostos cristalinos e em teores acima de 2%, aproximadamente.

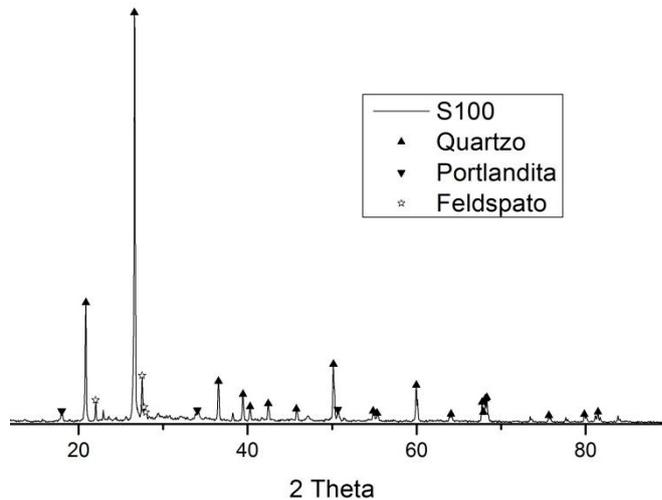
As quatro principais fases sólidas encontradas na pasta de cimento hidratada são: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (portlandita), o sulfoaluminato de cálcio e os grãos de clínquer não hidratados (METHA; MONTEIRO, 2008). Os demais produtos de hidratação do cimento Portland comum, segundo Cincotto (2011), são: a brucita (hidróxido de magnésio), a hidrogranada (aluminato tricálcico hexahidratado), o aluminato tetracálcico hidratado, o aluminato dicálcico octahidratado, a etringita (trissulfoaluminato de cálcio hidratado) e a hidrotalcita. Entretanto, segundo Spence (1991), o produto C-S-H é quase amorfo para a difração de raios X.

O resultado de DRX mostrou que os picos característicos do concreto referência são: quartzo (óxido de silício), portlandita (hidróxido de cálcio), feldspato (microclínio e albita) e alita (silicato tricálcico – C_3S).

Nos traços S20, S50 e S100 foram encontrados os minerais quartzo (óxido de silício), portlandita (hidróxido de cálcio), feldspato (microclínio e albita). Não foram encontrados minerais considerados deletérios ao concreto. Contudo, a presença dos argilominerais só poderia ser confirmada se as amostras fossem calcinadas, glicoladas e orientadas (SANTOS, 1992; EMBRAPA, 1997; ALBERS, 2002). Conclui-se que a substituição de areia por CAP I não alterou a composição mineralógica dos concretos deste estudo. A Figura 4.24 apresenta o difratograma do concreto S100.

Os demais difratogramas estão apresentados no Apêndice B.9 nas Figuras B.9.1 à B.9.4.

Figura 4.24 – Difratoograma de raios X – Concreto S100



Essa técnica é de fácil execução e complementa os resultados encontrados na técnica de EDS e DRX além das análises de composição química. Ressaltando que essa técnica detecta apenas os cloretos livres.

Figura 4.26 - Detecção de Cloretos – método colorimétrico



Fonte: Acervo pessoal

Em todas as amostras testadas não foram identificadas a cor branca ou prata, indicativo da presença de cloretos. Nem mesmo manchas brancas sobre as manchas marrons.

Para verificar a eficácia do método e da solução preparada, um bloco de pavimentação contendo cloretos foi fraturado e a mesma solução foi aspergida. Após alguns minutos o concreto apresentou a coloração prata.

Portanto, a presença de cloretos livres não foi detectada em nenhuma das amostras avaliadas. Essa constatação era esperada, pois a amostra de CAP I não contém quantidade expressiva de cloreto de sódio.

4.3 Concretos com adição do cascalho da terceira fase – CAP III

Nesta etapa da pesquisa foram avaliadas as propriedades dos concretos com adição do cascalho da terceira fase da perfuração. Os percentuais testados foram de 5%, 10% e 15% em relação à massa de cimento. Os resultados estão discutidos e apresentados a seguir.

4.3.1 Estado fresco

Os concretos contendo o CAP III foram ensaiados no estado fresco por meio das determinações da consistência pelo abatimento do tronco de cone, massa específica e moldados em corpos de prova cilíndricos.

O cimento utilizado também foi avaliado quanto ao seu tempo de pega quando adicionado ao CAP III.

4.3.1.1 Índice de consistência e massa específica

Deve-se dar atenção a certas propriedades reológicas da pasta de cimento no estado fresco, pois influenciam a microestrutura da pasta de cimento endurecida (METHA; MONTEIRO, 2008).

Os concretos com adição do CAP III apresentaram mudanças sutis no índice de consistência. Isso se deve ao aumento do teor de finos em uma mistura que demanda mais água para manter a mesma consistência e coesão. A mobilidade e a interação entre as partículas com diâmetros menores que 0,075 mm se deve, principalmente, às cargas de superfície. Foi necessária uma quantidade mínima de aditivo para manter o índice de consistência no estabelecido de 70 ± 10 mm. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Estado fresco - CAP III

Concretos	Índice de consistência (mm)	Massa específica (kg/dm ³)	Aditivo (%)
CR	75	2,35	0,07
A5	60	2,20	0,11
A10	65	2,30	0,07
A15	60	2,24	0,14

NOTA: CR – referência; A5 - 5% adição de cascalho; A10 - 10% adição de cascalho; A15 - 15% adição de cascalho.

Fonte: Acervo pessoal.

A massa específica dos concretos no estado fresco (Tabela 4.12) teve uma redução máxima de 6,4%, mas permanece sendo classificada como normal. Era esperado que o aumento do teor de finos na mistura provocasse um aumento na massa específica pelo empacotamento das partículas.

No estado fresco não foram percebidas mudanças no comportamento dos concretos que dificultassem sua preparação e moldagem dos corpos de prova, além das discutidas anteriormente.

4.3.1.2 Tempo de pega

O comportamento do cimento com adição do CAP III também foi avaliado pelo ensaio de determinação do tempo de pega ¹³segundo a NBR NM 65 (ABNT, 2002) (Tabela 4.13).

Tabela 4.13 – Tempo de pega – CAP III

TEMPO DE PEGA	CIMENTO (CP V ARI)	CIMENTO + CAP III
Início de pega	2 h e 5 min.	3 h e 15 min
Fim de pega	3 h e 3 min	4 h e 30 min

Fonte: Acervo pessoal

O teor de CAP III testado foi de 15%. O aumento no tempo de pega da mistura contendo o CAP III foi de uma hora e dez minutos e do fim de pega de uma hora e 27 minutos. Esse aumento pode ser justificado pela maior concentração de íons cálcio na solução (MUÑOZ, 2005).

4.3.2 Estado endurecido

Para avaliação das propriedades no estado endurecido os concretos com adição do CAP III foram testados para se verificar a resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade. Além disso, foram analisadas as propriedades microestruturais por meio de MEV e DRX. Durabilidade apenas por absorção de água e a detecção de cloretos. Os resultados obtidos, bem como as análises estatísticas realizadas, estão apresentados e discutidos a seguir.

4.3.2.1 Resistência à compressão axial

Os concretos foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os resultados médios e o percentual do coeficiente de variação de cada teste estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resistência à compressão axial – CAP III

CONCRETOS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) 3 dias	CV (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) 7 dias	CV (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa) 28 dias	CV (%)
CR	33,11	0,07	38,23	0,02	46,25	0,02
A5	28,13	0,02	35,92	0,17	39,44	0,04
A10	32,96	0,01	33,4	0,03	40,38	0,03
A15	28,36	0,03	33,13	0,01	37,48	0,04

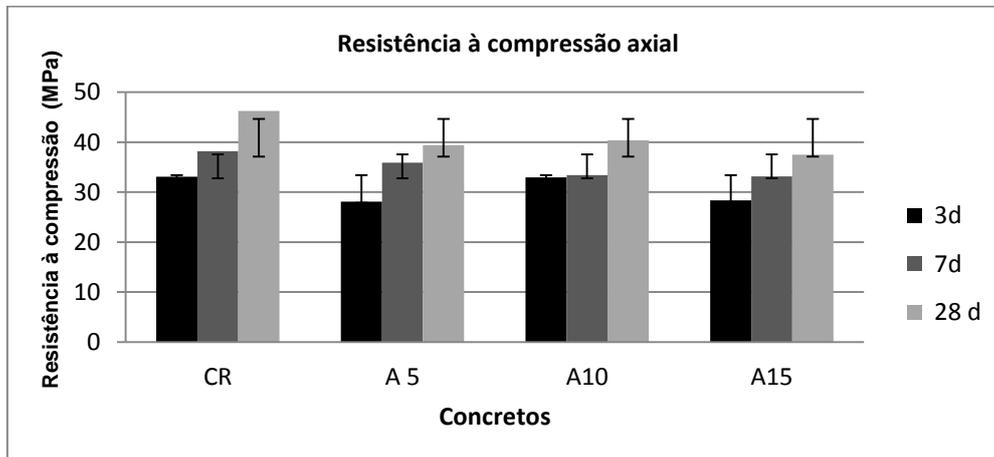
NOTA: CR – referência; A5 - 5% adição de cascalho; A10 - 10% adição de cascalho; A15 - 15% adição de cascalho.

Fonte: Acervo pessoal.

¹³ Este ensaio também foi realizado com o CAP I, porém não apresentou nenhuma diferença nos tempos de pega.

A Figura 4.27 representa os resultados médios de resistência à compressão axial dos concretos estudados para melhor visualização. Os concretos com adição de CAP III em geral obtiveram resultados de resistência inferiores ao concreto referência. Entretanto atenderam a resistência estabelecida (Tabela 3.1) mesmo com a adição do CAP III.

Figura 4.27 – Resistência à compressão axial – Concretos com adição de CAP III



NOTA: CR – referência; A5 - 5% adição de cascalho; A10 - 10% adição de cascalho; A15 - 15% adição de cascalho.
Fonte: Acervo pessoal.

Houve uma redução de até 19% aos 28 dias entre o concreto referência e o traço A15. A presença, principalmente dos argilominerais, causou essa redução, pois os mesmos retardam as reações de hidratação do cimento. Esse ponto está discutido no item 4.3.4.

A discreta redução do consumo de cimento nos traços com adição de CAP III também contribui para redução da resistência. O consumo de cimento do traço referência é de 365 kg/m³ enquanto os demais decaem 2 kg/m³, chegando então a 359 kg/m³ no traço A15.

Os concretos apresentaram correlação direta entre a massa específica e a resistência à compressão, à medida que diminui a densidade de massa diminui a resistência à compressão. O aumento dos poros pode ser observado nas micrografias de todos os concretos com adição de CAP III (Figura 4.33).

Os resultados de resistência à compressão nas idades avaliadas foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) cujos resultados estão resumidos na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Análise de variância da resistência à compressão com o percentual de adição do CAP III, idade e interação.

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% CAP III	377,59	3	125,86	92,88	2,76	0,000000	S
Idade	1266,66	2	633,33	467,38	3,15	0,000000	S
% CAP III*Idade	120,40	6	20,07	14,81	2,25	0,000000	S
Erro	81,30	60	1,36			0,000000	

Notas: SQ: Soma Quadrática. GL: Graus de liberdade. MQ: Média Quadrática. Fcal: Valor calculado de F. F tab: Valor tabelado de F.

Fonte: Acervo pessoal.

A análise estatística mostrou que o percentual de adição do CAP III, idade e interação dessas variáveis sobre a resistência à compressão são significativos, já que o valor de Fcal de cada variável é maior que o Ftab respectivo. Essa análise também mostrou que os efeitos individuais dos fatores analisados: o percentual de adição CAP III e idade são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Isto quer dizer que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exerce influência na resistência à compressão.

Uma importante consideração sobre este aspecto diz respeito à intensidade de influência dos fatores. Neste sentido, tomando-se como base a magnitude dos valores de Fcal, pode-se constatar que a variável mais influente na resistência à compressão foi a idade, em segundo lugar apresentou-se o percentual de adição de CAP III e a variável de menor influência foi, porém ainda significativa, a interação entre a idade e o percentual de adição de CAP III.

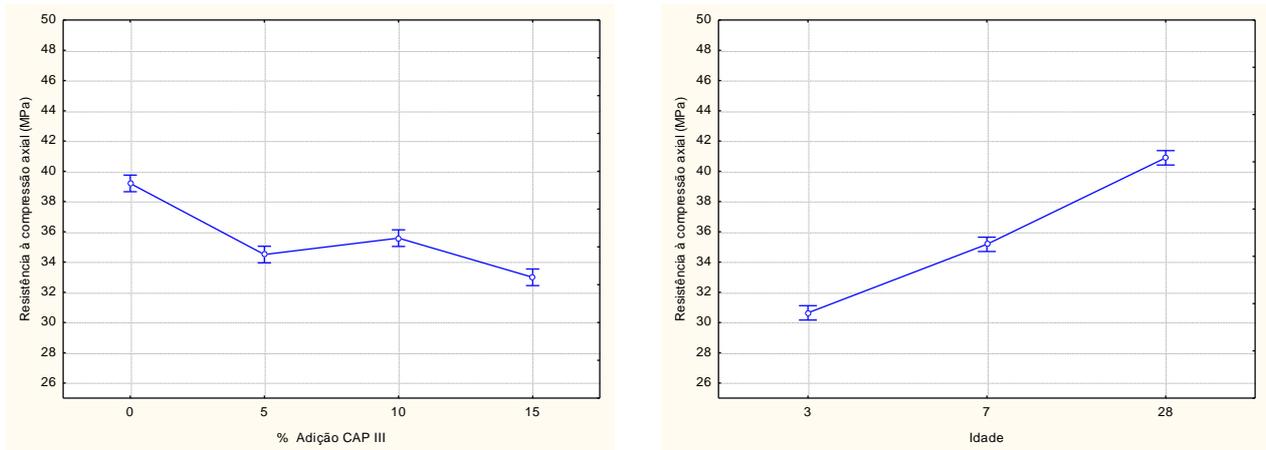
Por meio da análise estatística pode-se confirmar que quando aumenta o percentual de adição do CAP III a resistência à compressão axial tende a diminuir. A Figura 4.28 mostra os gráficos dos efeitos da resistência à compressão axial em relação ao percentual de adição do CAP III e as idades.

112 Apresentação e discussão dos resultados

Figura 4.28 – Efeito do percentual de adição e a idade sobre a resistência à compressão – CAP III

a) Percentual de adição

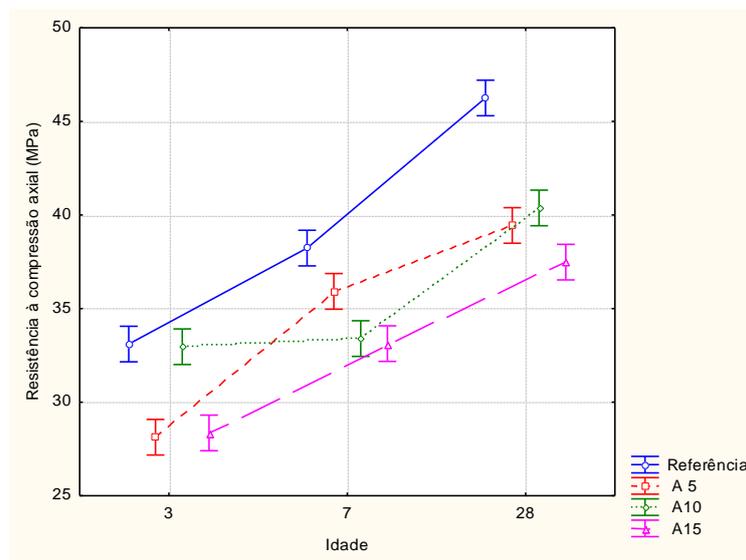
b) idades



Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.28 demonstra a tendência de crescimento da resistência com o aumento da idade, ressaltando-se que os incrementos de resistência até os 28 dias são consideráveis. Este comportamento é similar ao encontrado por tantos outros pesquisadores que estudaram concretos convencionais, dentre eles Neville (1997), Metha e Monteiro (2008), Andrade e Tutikian (2011). A Figura 4.29 mostra que a variável menos influente foi a interação da idade com o percentual de adição.

Figura 4.29 – Efeito do percentual da interação entre o percentual de adição e a idade sobre a resistência à compressão



Fonte: Acervo pessoal.

A resistência à compressão adquirida aos 28 dias no concreto com maior percentual de adição, traço A15, permite concluir que é possível a sua utilização do CAP III em concretos que requerem resistências de 35 MPa como concretos para pavimentação,

meio fio, blocos de concreto para pavimentação, blocos de concreto para alvenaria e outros elementos pré-moldados.

4.3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral estão na Tabela B.3.1 para o traço referência e nas Tabelas B.3.5 à B.3.7 para os traços com adição de CAP III no apêndice B desta dissertação. A análise estatística realizada (Tabela 4.16) verificou a variância dos resultados obtidos neste ensaio, a fim de comparar a influência do teor de adição do resíduo sobre a resistência à tração por compressão diametral dos concretos. Foi verificada a significância estatística, ao nível de confiança de 95 %, do efeito da variável investigada, por meio da análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.16 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral com o percentual de adição do CAP III

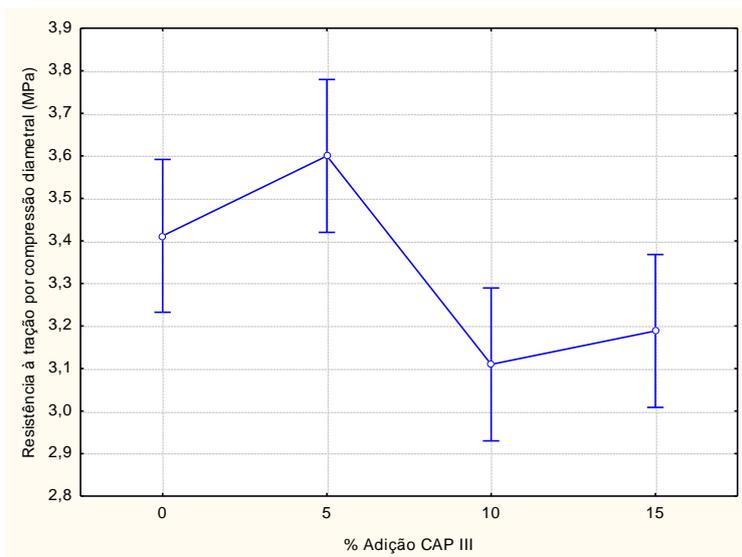
Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% Adição CAP III	0,8881	3	0,2960	6,650	3,10	0,002699	S
Erro	0,8903	20	0,0445				

Notas: SQ: Soma Quadrática. GL: Graus de liberdade. MQ: Média Quadrática. Fcal: Valor calculado de F. F tab: Valor tabelado de F.

Fonte: Acervo pessoal.

A Figura 4.30 apresenta os resultados de resistência à tração dos concretos com adição de CAP III.

Figura 4.30 – Efeito da adição de CAP III sobre a resistência à tração por compressão diametral – CAP III



Fonte: Acervo pessoal.

A moldagem dos corpos de prova pode ter provocado o comportamento diferenciado do traço A 5, além da variabilidade desse ensaio.

4.3.2.3 Módulo de elasticidade

Os concretos foram avaliados aos 28 dias e a Figura 4.31 apresenta o comportamento dos concretos com os diferentes teores de adição de CAP III.

De acordo com Andrade (1997), o módulo de elasticidade é influenciado nas primeiras idades pelo tipo de cimento e posteriormente pelas características elásticas do agregado, pelo tipo litológico e idade do concreto.

Na Tabela 4.17 é possível visualizar os resultados obtidos na análise de variância. A análise estatística mostrou que o percentual de adição do CAP III sobre o módulo de elasticidade é significativo, já que o valor de F_{cal} dessa variável é menor que o F_{tab} .

Tabela 4.17 - Análise de variância do módulo de elasticidade com o percentual de adição do CAP III

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% Adição CAP III	38,26	3	12,75	5,127	4,07	0,028726	S
Erro	19,90	8	2,49				

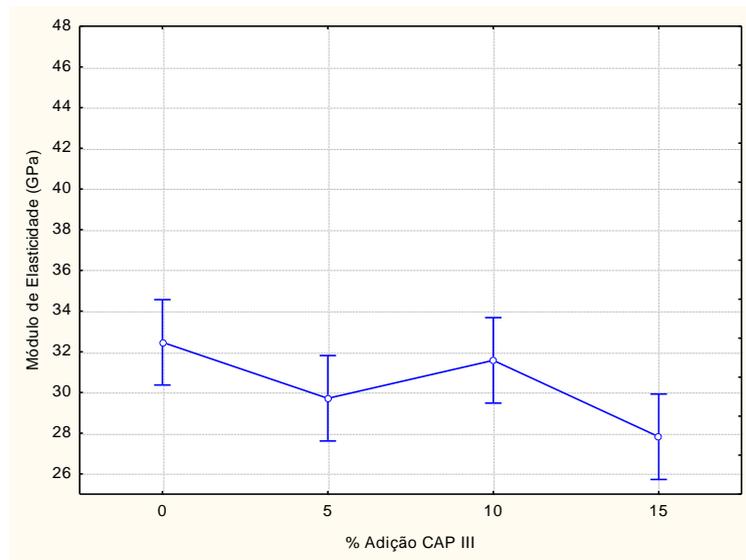
Notas: SQ: Soma Quadrática. GL: Graus de liberdade. MQ: Média Quadrática. F_{cal} : Valor calculado de F. F_{tab} : Valor tabelado de F.

Fonte: Acervo pessoal.

Tomando-se como base a magnitude dos valores de F_{cal} , pode-se constatar que a variável percentual de adição CAP III, apesar de significativa, não modifica os valores do módulo estabelecidos pelo programa experimental, exceto no traço A15 onde o resultado médio foi menor que 30 GPa. As pequenas variações observadas podem ser atribuídas à variabilidade dos ensaios.

Sendo o CAP III originado predominantemente de rochas metamórficas que possuem menor módulo de elasticidade, os diferentes percentuais de adições de CAP III podem explicar a redução significativa do módulo de elasticidade (Figura 4.31).

Figura 4.31 – Efeito do percentual de adição do CAP III sobre o módulo de elasticidade



Fonte: Acervo pessoal.

4.3.3 Durabilidade

4.3.3.1 Absorção de água

A durabilidade dos materiais constituintes é uma característica tão importante quanto a sua resistência. Essa preocupação torna-se crítica quando se utiliza materiais alternativos na composição do concreto, principalmente resíduos, sendo de suma importância o estudo a respeito das propriedades que afetam a durabilidade e a suscetibilidade aos agentes agressivos, bem como a forma de neutralizá-los.

A adição do CAP III aumentou a absorção de água nos concretos em relação ao concreto referência. Os valores encontrados foram similares à pesquisa de John (2001) com agregados graúdos de resíduo de construção e demolição. O teor, apesar de ter aumentado até 40%, não ultrapassou o objetivo determinado (Tabela 3.1), menor que 10%.

Segundo Neville (1997), a maioria dos bons concretos têm absorção bem abaixo de 10% em massa. Sendo considerado o volume ocupado pela água, deve ser levada em conta a diferença entre as massas específicas da água e do concreto.

Esse desempenho pode ser atribuído ao aumento do índice de vazios, como será visto no item 4.3.4. Variações nos valores de absorção são geralmente acompanhadas por variações do índice de vazios e da massa específica do concreto.

Na Tabela 4.18 estão apresentados os resultados da ANOVA aplicada para os valores obtidos a partir dos ensaios de absorção de água. A análise de variância indica que as variáveis influenciaram significativamente os resultados, ao nível de confiança de 95%.

116 Apresentação e discussão dos resultados

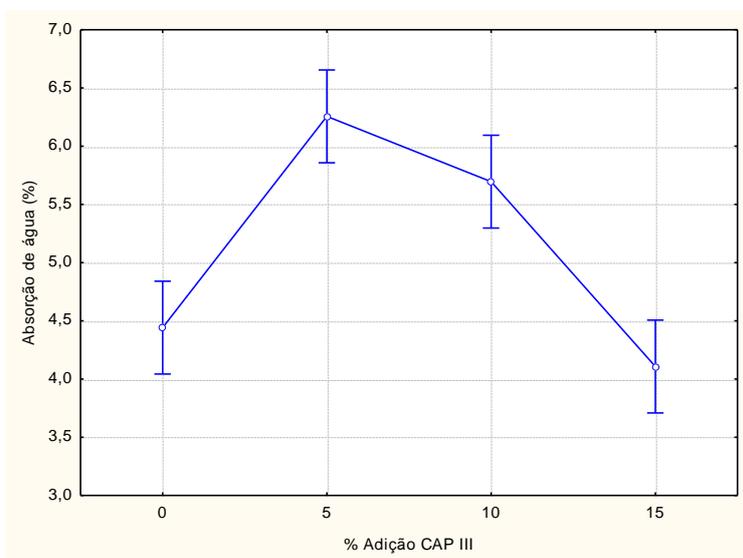
Tabela 4.18 – Análise de variância da absorção de água com o percentual de adição do CAP III

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Significância
% Adição CAP III	18,6376	3	6,2125	28,344	3,10	0,000000	S
Erro	4,3837	20	0,2192				

Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 4.32 o gráfico ilustra o comportamento da absorção dos concretos em função do teor de adição de CAP III. Observa-se que as amostras A5 e A10 apresentaram resultados acima aos do concreto de referência e o traço A15 inferior.

Figura 4.32 – Efeito do percentual de adição do CAP III sobre a absorção de água



Fonte: Acervo pessoal.

Esses resultados são interessantes do ponto de vista da durabilidade do concreto, pois mostram que a presença de CAP III não aumenta a absorção de água acima dos limites estabelecidos como alvo máximo de 10% (Tabela 3.1).

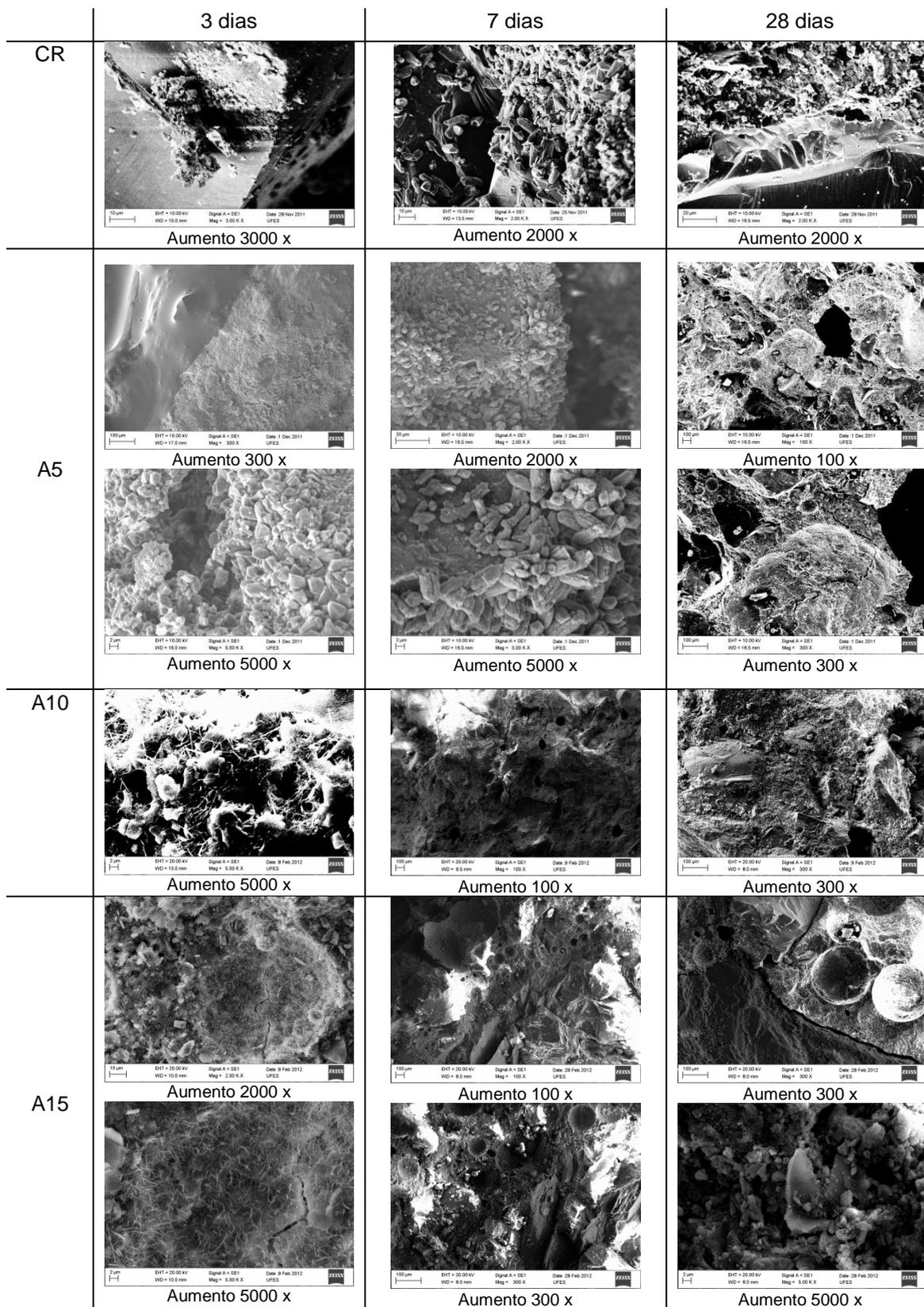
4.3.4 Propriedades Microestruturais

4.3.4.1 Microscopia eletrônica de varredura

Na Figura 4.33 estão apresentadas micrografias da microestrutura das amostras de concreto aos 3, 7 e 28 dias de idade, realizadas com o objetivo de identificar possíveis sinais de deterioração incipiente provocada pela adição de CAP III.

Essas e as demais micrografias feitas nos concretos podem ser visualizadas na íntegra no Apêndice B.6 nas Figuras B.6.1 à B.12 para o concreto referência e no Apêndice B.8 nas Figuras B.8.1 à B.8.35 para os concretos com CAP III.

Figura 4.33 – Micrografias dos concretos com adição do CAP III em diferentes idades



Fonte: Acervo pessoal.

As micrografias apresentadas são representativas de diversas áreas analisadas, nas quais não foram observadas bordas ou quaisquer produtos de reação estranhos à

estrutura comum do concreto. O que se pode constar em relação ao concreto referência foi o aumento da quantidade de poros na argamassa do concreto e produtos de reação como a etringita aos 3 dias nos traços A10 e A15 (retardo nas reações).

A ausência da etringita nos demais traços investigados se deve ao tipo de cimento utilizado que contém um teor maior de C_3A^{14} , acelerando as reações de hidratação do cimento. Portanto comprova-se que a presença de argilominerais no teor de 10% e 15% em relação à massa de cimento do traço A10 e A15 retardaram a formação de etringita, sendo essa encontrada ainda aos 3 dias.

A presença de etringita vista na micrografia do traço A10 e A15 aos 3 dias comprova essa reação. Segundo Muñoz (2005), esses minerais presentes nos sistemas de concretos podem ser os maiores componentes de reatividade devido ao seu pequeno tamanho, grande área superficial e composição química.

Os resultados dos estudos de Muñoz (2005) indicam que a presença de bentonita cálcica acelera as reações de hidratação em relação à amostra controle e que são formados os produtos como etringita, portlandita e silicatos dicálcico hidratado (CSH) precocemente. E ao contrário, na presença de bentonita sódica as reações de hidratação eram retardadas. Como indicativo os produtos de hidratação mencionados apareciam tardiamente ou desapareciam na reação com a alita (C_3S). Contudo, o exato mecanismo pelo qual as argilas afetam essas propriedades não é estabelecido.

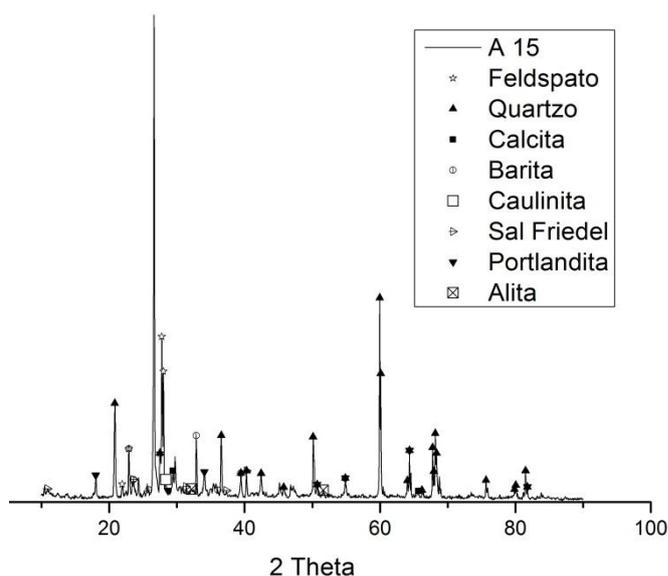
4.3.4.2 Difração de raios X

Contudo, enquanto imagens apenas apresentam uma distribuição espacial, a microanálise e a difração de raios X disponibilizam informações mais detalhadas, como por exemplo, propriedades químicas e mineralógicas das amostras. Para tanto, estudos adicionais se fazem necessários, visto que, na maioria das vezes, imagens são qualitativas e só permitem uma avaliação morfológica dos produtos obtidos (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

Para identificação das fases minerais presentes foram realizadas as difrações de raios X nas amostras de concreto com adição de CAP III aos 28 dias.

¹⁴ C_3A - Aluminato tricálcico.

Figura 4.34 – Difratoograma de raios X – Concreto A 15



Fonte: Acervo pessoal.

Os demais difratogramas estão apresentados no Apêndice B.9 na Figura B.9.1 para o concreto referência e nas Figuras B.9.5 à B.9.7 para os concretos com adição de CAP III.

Os principais minerais encontrados foram o quartzo (óxido de silício), a portlandita (hidróxido de cálcio), feldspato (albita e microclínio), a calcita, a caulinita e o sal de Friedel (cloroaluminato de cálcio hidratado).

Os minerais não encontrados no concreto referência e encontrados no traço A15 foram a calcita, a caulinita, e o sal de Friedel (cloroaluminato de cálcio hidratado).

A calcita e a caulinita são oriundas do CAP III e o sal de Friedel por meio da reação da halita (cloreto de sódio) com o C_3A ¹⁵ do cimento.

O C_3A é o responsável pela formação do cloroaluminato de cálcio hidratado (Sal de Friedel), o qual, ao fixar os íons cloreto, contribui para a diminuição da concentração de cloretos livres na solução contida nos poros do concreto oriundo do CAP III.

Outro método para detecção do cloreto livre será apresentado no item 4.3.5.

4.3.5 Detecção de Cloretos – método colorimétrico

A presença de cloretos no concreto pode ocasionar o aparecimento de eflorescência, e formação de compostos expansivos como os cloroaluminatos cálcicos. Embora pouco

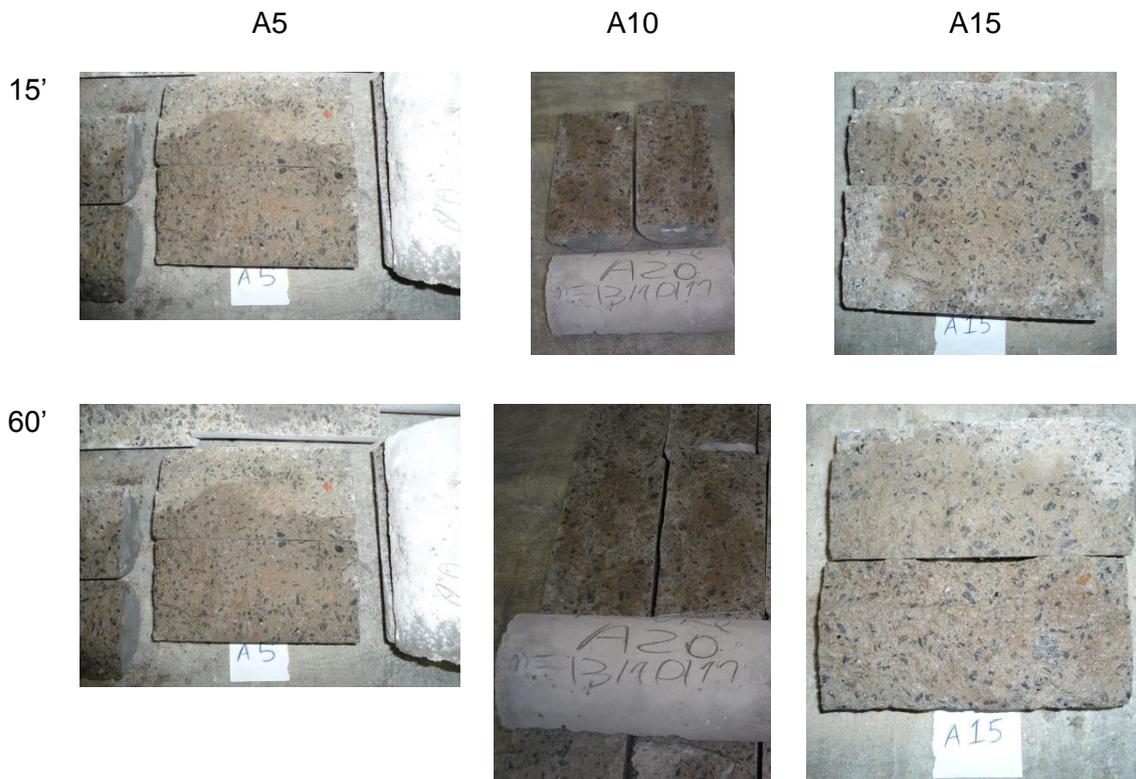
¹⁵ C_3A – Aluminato tricálcico.

120 Apresentação e discussão dos resultados

estáveis esses compostos podem ocasionar fissuração da microestrutura do concreto, o que favorece o aparecimento de outras manifestações patológicas. Do mesmo modo, teores mais elevados de cloretos tendem a acelerar as reações de hidratação, acelerando a pega e a resistência inicial e reduzindo as resistências em longo prazo, nem sempre desejáveis (BATTAGIN, 2010).

A presença de cloretos foi investigada pelo método colorimétrico com a aspersão do nitrato de prata nas superfícies recém fraturadas dos concretos com a idade de 28 dias e está apresentada na Figura 4.35. Fotografias tiradas aos 15 e 60 minutos após a aspersão do nitrato sobre o concreto.

Figura 4.35 - Detecção de cloretos método colorimétrico – Concretos com CAP III



Fonte: Acervo pessoal.

Em todas as amostras testadas não foram identificadas a cor branca ou prata, indicativo da presença de cloretos. Nem mesmo manchas brancas sobre as manchas marrons. Lembrando que este método só detecta cloretos livres.

A presença de cloretos não foi detectada em nenhuma das amostras avaliadas por esse método. Porém, nas amostras avaliadas durante as análises microestruturais foram encontrados os elementos sódio e cloro nos teores de 5,82 e 10,39 respectivamente (traço A15).

Essa fixação dos íons cloreto tem sua principal forma, citada por Neville (1997), pela reação com o C_3A , presente no cimento, formando cloroaluminato de cálcio, também conhecido como sal de Friedel. Os íons cloreto ficam retidos quanto mais altos os teores de C_3A do cimento. A escolha do cimento CP V ARI, com teor de C_3A aproximadamente de 8%, auxiliou na formação do sal de Friedel.

Sendo então necessária a análise ambiental para verificar a possibilidade de lixiviação e solubilização desse sal para o meio.

4.3.6 Classificação ambiental

O desenvolvimento de materiais alternativos que permitam o reaproveitamento de resíduos é sempre uma alternativa a ser considerada, não só do ponto de vista econômico como também deve ser considerado sob o ponto de vista ambiental (ARRIVABENE, 2000).

Os cascalhos *in natura* e os concretos com substituição e adição de cascalhos foram classificados ambientalmente de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Para o extrato lixiviado não houve valores acima dos limites máximos permitidos segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004). No anexo B desta dissertação se encontram todos os relatórios de classificação dos resíduos e dos concretos avaliados.

A Tabela 4.19 apresenta os valores dos parâmetros determinados no extrato solubilizado que superam os limites máximos permitidos segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) em seu anexo G e por isso classificam o CAP I, CAP III e os concretos de traços S100 e A15 como Classe II A – Não Inerte.

Tabela 4.19 – Valores obtidos no extrato solubilizado que suplantaram o valor máximo permitido no CAP I

Parâmetro	Unidade	L.Q.	Resultados Analíticos	V.M.P. NBR 10004 (ABNT, 2004)
Alumínio	mg/L	0,01	1,4	0,2
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	0,032	0,01
Ferro	mg/L	0,01	0,685	0,3
Sulfato	mg/L	10	431	250
Sódio	mg/L	0,5	255	200

Nota: L.Q. – limite de quantificação; V.M.P. – valores máximos permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

Em virtude do teor de alumínio, índice de fenóis, ferro, sulfatos e sódio terem suplantado os valores máximos permitidos pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) a amostra de CAP I precisa de uma destinação correta. Esses elementos dispostos incorretamente podem causar contaminações em solos e mananciais de águas.

122 Apresentação e discussão dos resultados

Tabela 4.20 – Valores obtidos no extrato solubilizado que suplantaram o valor máximo permitido no CAP III

Parâmetro	Unidade	L.Q.	Resultados Analíticos	V.M.P. NBR 10004 (ABNT, 2004)
Alumínio	mg/L	0,01	4,0	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	0,022	0,01
Cloreto	mg/L	20	1751	250
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	0,049	0,01
Ferro	mg/L	0,01	2,9	0,3
Fluoreto	mg/L	2	6,4	1,5
Surfactante (como LAS)	mg/L	0,1	0,69	0,5
Sódio	mg/L	0,5	1277	200

Nota: L.Q. – limite de quantificação; V.M.P. – valores máximos permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

Observa-se na Tabela 4.20 que a concentração de alumínio presente no extrato solubilizado da amostra de CAP III é 20 vezes superior ao limite máximo permitido. O teor de arsênio detectado é maior que o dobro do limite máximo. O parâmetro que se apresentou mais alterado foi o cloreto, que tem 7 vezes a concentração máxima seguido do sódio com seis vezes acima dos limites. Os demais parâmetros que superaram os limites foram arsênio, índice de fenóis, ferro, fluoreto e surfactantes.

Tabela 4.21 – Valores obtidos no extrato solubilizado que suplantaram o valor máximo permitido no traço S100

Parâmetro	Unidade	L.Q.	Resultados Analíticos	V.M.P. NBR 10004 (ABNT, 2004)
Alumínio	mg/L	0,01	1,6	0,2
Bário	mg/L	0,01	0,730	0,7
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	0,044	0,01

Nota: L.Q. – limite de quantificação; V.M.P. – valores máximos permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

Para os concretos com substituição de CAP I no traço S 100 os limites excedidos no extrato solubilizado, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), foram dos parâmetros alumínio em cerca de oito vezes acima do limite máximo, bário e o índice de fenóis. Os parâmetros ferro, sulfato e sódio que estavam ultrapassando os limites no CAP I foram encapsulados na matriz cimentícia.

Tabela 4.22 – Valores obtidos no extrato solubilizado que suplantaram o valor máximo permitido no traço A 15

Parâmetro	Unidade	L.Q.	Resultados Analíticos	V.M.P. NBR 10004 (ABNT, 2004)
Alumínio	mg/L	0,01	2,0	0,2
Bário	mg/L	0,01	0,918	0,7
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	0,042	0,01
Ferro	mg/L	0,01	0,686	0,3

Nota: L.Q. – limite de quantificação; V.M.P. – valores máximos permitidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

Para os concretos com adição de CAP III no traço A 15 os limites excedidos no extrato solubilizado, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), foram dos parâmetros alumínio em cerca de 10 vezes, do bário em teores inferiores que o dobro da concentração, do índice de fenóis em quatro vezes mais e do ferro no dobro do limite máximo permitido. Os parâmetros cloreto, sódio, surfactante, fluoreto e arsênio que tinham seus limites excedidos no CAP III foram encapsulados no concreto e não apresentam potencial de solubilização ao meio fora dos limites máximos.

Podemos concluir que a quantidade de aglomerante não foi suficiente para promover o encapsulamento dos contaminantes, contidos nos cascalhos, dos concretos testados. Ressaltando que os limites desses parâmetros estão baseados nos padrões de potabilidade da água já discutidos no Item 2.4.3.2 desta dissertação.

Capítulo 5

Eu não procuro saber as respostas, procuro compreender as perguntas.

Confúcio

5 CONCLUSÕES

Visando organizar a apresentação das conclusões, as mesmas serão agrupadas segundo a especificidade do tema abordado.

5.1 Quanto à caracterização dos cascalhos da fase I – CAP I

Os ensaios de caracterização do CAP I permitiram identificar que quanto à granulometria por peneiramento a amostra se compara a uma areia utilizável em concreto. O CAP I apresenta valores considerados normais para agregado miúdo quanto à distribuição granulométrica, ao módulo de finura, a dimensão máxima característica, a massa específica e a massa unitária.

Os limites de Atterberg determinaram que o CAP I é não plástico.

O CAP I é um material de natureza alcalina, determinado pelo seu pH.

A análise por fluorescência de raios X encontrou os principais elementos que foram expressos nos seus óxidos mais estáveis e são o silício e o alumínio.

A energia dispersiva de raios X identificou os elementos sódio e cloro que pode ser um indicativo da presença em pequena concentração de cloreto de sódio.

A difração de raios X e a análise petrográfica identificaram como principais minerais o quartzo e o feldspato além da turmalina preta e mica moscovita. O difratograma de raios X mostra a natureza essencialmente cristalina. A rocha perfurada foi um arenito da formação Rio Doce.

As análises térmicas por meio de termogravimetria e calorimetria diferencial exploratória indicam que o material é inorgânico e livre de contaminações orgânicas. Também confirma a presença de quartzo.

A caracterização da forma do grão por análise de imagem o classifica como subarredondado e grau de esfericidade alta.

Em virtude do teor de alumínio, índice de fenóis, ferro, sulfatos e sódio terem suplantado os valores máximos permitidos pela norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) a amostra de CAP I foi caracterizada como Classe II A – Não Inerte.

5.2 Quanto à caracterização dos cascalhos da fase III – CAP III

O CAP III é composto por 30% de areia, 40% de silte e 30% de uma argila pouco plástica.

A medição do pH no CAP III indicou como este sendo um material alcalino.

Por meio da análise quantitativa por fluorescência de raios X seus elementos principais expressos nos seus óxidos mais estáveis são o cálcio e o silício.

A energia dispersiva de raios X identificou os elementos sódio e cloro que é um indicativo da presença de cloreto de sódio.

Calcita, dolomita, caulinita e quartzo são os minerais encontrados por difração de raios X e que compõem esse cascalho. Tendo ainda o mineral halita (cloreto de sódio) como contaminante, oriundo do fluido de perfuração. A rocha perfurada pertence à formação Regência.

A amostra de CAP III foi caracterizada como Classe II A – Não Inerte.

5.3 Quanto aos concretos

5.3.1 Concretos com substituição de CAP I

Os valores encontrados para as características físico-mecânicas dos demais materiais utilizados na fabricação dos concretos estudados estão dentro dos limites especificados pelas normas da ABNT, exceto o agregado graúdo que não atende aos limites para sua zona granulométrica.

A substituição dos cascalhos da primeira fase da perfuração por areia altera significativamente a reologia do concreto fresco. O aumento da viscosidade dificulta a trabalhabilidade. Ajustes no traço são necessários para sua substituição.

A massa específica dos concretos com substituição de CAP I no estado fresco apresentou tendência de queda, porém continuam sendo classificadas como normal.

As proporções testadas reduzem significativamente a resistência à compressão axial e aumentam a absorção de água. Contudo não comprometem a resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade.

As propriedades microestruturais dos concretos não foram afetadas. As micrografias apresentadas mostram características gerais associadas com os produtos de hidratação do cimento.

O método qualitativo de detecção de cloretos não identificou cloretos livres nas amostras de concreto. Portanto, este trabalho não pode restringir o uso do CAP I para concretos não armados.

Os concretos com substituição de CAP I no traço S 100 foi caracterizado como Classe II A – Não Inerte.

Todos os parâmetros estabelecidos no programa experimental foram devidamente atendidos.

Devido à trabalhabilidade o traço considerado de melhor desempenho foi o S50, onde 5% da massa total do concreto foi substituída por CAP I.

5.3.2 Concretos com adição de CAP III

A adição de CAP III modificou o tempo de pega do cimento. A viscosidade teve discreto aumento. A massa específica dos concretos no estado fresco teve uma redução, mas permanece sendo classificada como normal.

Todas as propriedades mecânicas foram alteradas significativamente, porém continuaram atendendo aos objetivos estabelecidos no programa experimental, exceto no módulo de elasticidade do traço A15.

Alterações na microestrutura foram observadas nos concretos com adição de CAP III nos traços A10 e A15. Essas se tornaram mais porosas e a formação dos compostos hidratados se deu de forma mais lenta.

A presença de sal de Friedel no traço A15 pode ocasionar a formação de compostos expansivos. O método qualitativo de detecção de cloretos não identificou cloretos livres nas amostras de concreto.

Os concretos com substituição de CAP I no traço S 100 foi caracterizado como Classe II A – Não Inerte.

A adição de até 5% do CAP III em concretos é a mais viável tecnicamente de acordo com os ensaios realizados.

5.3.3 Conclusões gerais

Os resultados apontaram que o uso dos cascalhos em materiais a base de cimento é vinculado a sua caracterização prévia.

A incorporação dos cascalhos em concretos é uma alternativa a exploração das jazidas de agregados naturais e redução das áreas de aterro.

Pode-se concluir que existe o potencial de substituição de cascalhos de perfuração em concretos nos teores indicados quando comparados ao concreto referência.

A adição do CAP III aumenta o consumo de cimento e necessita de mais estudos para verificação da viabilidade econômica.

O uso do cascalho como agregado para concreto merece mais pesquisas, caracterização das formações geológicas e definição de um método de separação e coleta para serem aproveitados.

5.4 Sugestões para pesquisas futuras

Através do presente tema, sugerem-se alguns assuntos para estudos futuros, que seriam enriquecedores para um melhor conhecimento do comportamento dos cascalhos de perfuração com materiais a base de cimento.

- Realizar estudos do comportamento reológico do cimento com os cascalhos secos a diferentes temperaturas;
- Avaliar a durabilidade dos concretos produzidos frente à presença de argilominerais expansivos;
- Avaliar as propriedades mecânicas em idades avançadas de 90, 180 e 360 dias;
- Estudar o encapsulamento dos contaminantes do cascalho em concretos;
- Caracterizar estatisticamente os cascalhos oriundos do norte do Espírito Santo;
- Investigar as possíveis reações álcali-agregados;
- Investigar os minerais presentes nos cascalhos.

São sugeridas também as pesquisas com a inserção dos cascalhos em materiais cerâmicos, mesmo já tendo sido alvo da pesquisa de Pires (2009), visto as diferenças geológicas encontradas nos cascalhos de cada região.

O uso como base de pavimentação, estabilização de solos, em artefatos de concreto (blocos de pavimentação, blocos de concreto, argamassas, blocos quebra-mar, concretos especiais, concretos betuminosos) também necessitam ser investigadas.

REFERÊNCIAS

A. Referências Bibliográficas

ABBE, O. E. *et al.* Novel sintered glass-ceramics from vitrified oil well drill cuttings. **Journal Material Science**. v 44. p. 4296–4302, 2009.

ALBERS, A. P. F. *et al.* O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica** [online]. 2002, v.48, n. 305, p. 34-37. ISSN 0366-6913.

AL-ANSARY, M. S.; AL-TABBAA, A. Stabilisation/solidification of synthetic North Sea drill cuttings containing oil and chloride. **Proceedings of the International RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Building and Structures**, V. 2, Barcelona, 2004, p. 833–842.

AL-ANSARY, M. S.; AL-TABBAA, A. Comparison of Stabilised/Solidified Mixed of Model Drill Cuttings Based on the North Sea and Red Sea Areas. **SPE Publication 106799**. SPE E&P Environmental and Safety Conference held in Galvesion, Texas. U.S.A., 5-7 March 2007.

AMARAL, Sérgio. **Sonda de perfuração petrolífera**. Disponível em: <<http://petroleo21.blogspot.com/p/plataformista.html>>. Acesso em: 23 jan. 2012.

ANDRADE, Walton Pacelli (Org). **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997. Cap 6, p. 1-64

ANDRADE, J. J. de Oliveira e TUTIKIAN, B. F. Resistência Mecânica do Concreto. In: ISAIA, G.C. (Org). **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v. v. 1, p. 615-654. ISBN: 978-85-98576-16-9.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V. M. Determinação dos teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de RCD reciclados. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43°, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, IBRACON, 2001.

ANP- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2010.

ANP- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2006.

ARAÚJO, Georgia Serafim; BICALHO, Kátia Vanessa; TRISTÃO, Fernando Avancini. Determinação da forma das areias através da análise de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ANTAC, 2003. p. 121-130.

ARRIVABENE, Lúcio Flávio. **Uma contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para a produção de concretos**. 2000. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2000.

BATTAGIN A. F.; BATTAGIN, I. L. da S. A Norma Brasileira de água de amassamento do concreto: uma contribuição para a sustentabilidade. **Concreto e Construções**, São Paulo, n.58. abr./maio/jun. 2010. Disponível em: <www.ibracon.org.br>. Acesso em: 4 mar. 2012.

BLEIER, R.; LEUTERMAN, A. J. J.; STARK, C. L. Drilling Fluids: Making Peace with the Environment. **SPE 24553**. In: 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Washington, DC, USA, 4-7 October. 1992.

BORGES, F. A. T. **Biodegradação de fluidos e de cascalhos oriundos da perfuração de poços de petróleo e gás**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2006.

BOURGOYNE Jr, A.T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E., YOUNG Jr, F.S. **Applied Drilling Engineering**, 1991.

BRASIL. **Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res31302.html>>. Acesso em 19 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 3 de ago. 2010.

BROWNING, K.; SEATON, S. Drilling Waste Management Case Histories Demonstrate that Effective Drilling Waste Management Can Reduce Overall Well-Constructions Costs. **SPE 96775**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, U.S.A., 9-12 October, 2005.

CARVALHO, A., L. (2005). **Estudo dos fluidos de perfuração e seus impactos relacionados às atividades da indústria de petróleo**, 2005. 74p. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Itajubá. Disponível em:<http://www.dnc.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH16/Alexandra-Lima-de-Carvalho_PRH16_UNIFEI_G.pdf>. Acesso em 16 ago 2010.

CHARLES, M.; SAYLE, S. Offshore Drill Cuttings Treatment Technology Evaluation. **SPE Publication 126333**. SPE International Conference on Health, Safety and Environmental in Oil and Gas Exploration and Production held in Rio de Janeiro, Brazil., 12-14 Abril, 2010.

CHEN, T.; KUNG U, N. C.; LIN, S. An Innovative Utilization of Drilling Wastes as Building Materials. **SPE Publication 106913**. SPE E&P Environmental and Safety Conference held in Galvesion, Texas. U.S.A., 5-7 March, 2007.

- COELHO, Antonio C. Vieira; SANTOS, Pécisio de Souza; SANTOS, Helena de Souza. Argilas especiais: o que são, caracterização e propriedades. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 30, n. 1, fev. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000100026&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 02 mar. 2012.
- DHIR, R.K.; CSETENYL, L.J.; DYER, T.D.; SMITH, G.W. Cleaned oil-drill cuttings for use as filler in bituminous mixtures. **Construction and Building Materials**. V. 24. p. 322-325. 2010.
- ECONOMIDES, M.J., WATTERS, L.T., DUNN-NORMAN, S. **Petroleum Well Construction**. 1 ed., New York, John Wiley & Sons. , 1998, 904 p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997.
- EPA, 1999, 40 CFR Part 435**, Effluent Limitation Guidelines and New Source Performance Standards for Synthetic-Based and Other Non-Aqueous Drilling Fluids in the Oil and Gas Extraction Point Source Category; Proposed Rule, February 3, EPA.
- FIALHO, P. F.; CALMON, J. L.; GONÇALVES, G. R.; TRISTÃO; F. A.; NUNES, E.; CUNHA, ALFREDO. Caracterização térmica e mineralógica de cascalho de perfuração do norte capixaba: Estudos iniciais. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2011, Porto de Galinhas. **Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 2011 a. v. 55.
- FIALHO, P. F.; CALMON, J. L.; TRISTÃO; F. A.; VIEIRA, G. L. Influência da substituição da areia natural por cascalhos de perfuração em concretos não estruturais: ensaios piloto. In: II SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2011, Maceió. **II SEMINÁRIO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**, 2011 b. v. 2.
- FIALHO, P. F.; CALMON, J. L.; TRISTÃO; F. A. Blocos de concreto para pavimentação intertravada com cascalho de perfuração de poços de petróleo do norte capixaba. Estudos iniciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53, 2011, Florianópolis. **Anais ...**, Florianópolis: IBRACON, 2011 c.
- FIALHO, P. F.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L.; MARTINEZ, U.B. Caracterização de agregados miúdos por análise de imagem. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2012, Curitiba. **Congresso Brasileiro de Cerâmica**, 2012. v. 56. (em impressão).
- FUQIANG He, CAIJUN Shi, QIANG Yuan, XIAOPENG An, BAIHUI Tong. Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃ colorimetric measurement. **Cement and Concrete Research**. v. 41, n.11. p. 1095–1103. Disponível em: <<http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>>. Acesso em: 28 ago. 2011.
- HALL, J.A., 2001, *Ester Based Drilling Fluids – Still the Best Environmental Option?* **Baroyd Discussion Paper**, Aberdeen, United Kingdom.
- HELENE, P.; ANDRADE T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C.(Ed.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2 v., v.2, p. 905-944. 2007.
- HELENE, P., TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992.
- JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113p. Tese (Livre Docência)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

- JOSHI, R.C.; LOTHIA, R.P.; ACHARI, G. Fly ash-cement mixtures for solidification and detoxification of oil and gas well sludges. **Transportation Research Record**. v.1486, p. 35-41.1995. ISSN: 0361-1981.
- KHONDAKER, A. N., 2000, Modeling the Fate of Drilling Waste in Marine Environment – an Overview. **Computers & Geosciences**. v. 26, n. 51.p. 531-540. 2000.
- KIELING, Amanda Gonçalves. **Influência da segregação no desempenho de cinza de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 1995. Disponível em: <http://bdtd.unisinos.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=995>. Acesso em 17 ago. 2010.
- LEONARD, S.A.; STEGEMANN, J.A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings. **Journal of Hazardous Materials**. v. 174. p. 463-472. 2010.
- MARQUES, F. H. **Destinação de cascalho proveniente da perfuração de poços na área do ativo de produção do norte capixaba: situação atual e oportunidades de melhorias**. UN-ES – ENGP – Engenharia de Poços. Vitória, 2008.
- MEDEIROS, Leonardo Coutinho. **Adição de Cascalho de Perfuração da Bacia Potiguar em argilas para uso em materiais cerâmicos: influência da concentração e da temperatura de queima**. 2010. 91f. Dissertação (Mestrado em ciências e engenharia de materiais). Programas de Pós-Graduação em ciências e engenharia de materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.
- MILANI, E. J. ; BRANDÃO, J. A. S. L.; ZALÁN, P. V.; GAMBOA, L. A. P. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n.3. p. 351– 396. 2000.
- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo. IBRACON, 2008.
- MOHAMMADI, M. K.;TAHMASBI, K Drilling Waste Management Plans for Exploration and Production Operations in Iran. **SPE Publication 111941-MS**. SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, 15-17 April 2008, Nice, France.
- MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 463 p. ISBN 978-85-216-1664-1.
- MUÑOZ, J. F. *et al.* **Effects of Coarse Aggregate Clay-Coatings on Concrete Performance**. An *IPRF* Research Report Innovative Pavement Research Foundation. Airport Concrete Pavement Technology Program. Madison, WI. 2005.
- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e avaliação de experimentos**. 2. ed. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1992. 213p. (Caderno de Engenharia, 17).
- NEFF, J.M.; S. MCKELVIE ; R.C. AYERS, Jr. 2000. Environmental impacts of synthetic based drilling fluids. Report prepared for MMS by Robert Ayers & Associates, Inc. August 2000. U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS **Study MMS 2000-064**. 118 pp. Disponível em: <[http://www.gomr.boemre.gov/PI/PDFImages/ESPIS/3/3175 .pdf](http://www.gomr.boemre.gov/PI/PDFImages/ESPIS/3/3175.pdf)>. Acesso em: 20 fev.2011.
- NEVILLE, Adam Mathew. Propriedades do concreto. Trad. Salvador E. Giammusso. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

OPETE, S.E.O.; MANGIBO, I.A.; IYAGBA, E.T. Stabilization/solidification of synthetic Nigerian drill cuttings. **African Journal of Environment Science and Technology**. V. 4. p. 149-153. 2010.

OSPAR. On The Use of Organic-phases Drilling Fluids (OPF) and the Discharge of OPF Contaminated Fluids. OSPAR Decision 2003/1. **OSPAR Commission 2000**.

PAGE. P. W.; GREAVES. Chris.; LAWSON. R.; HAYES. Sean.; BOYLE, F. Options for the Recycling of Drill Cuttings. **SPE Publication 80583**. SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental conference held in San Antonio, Texas, U.S.A., 10-12 March 2003.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: ISAIA, G. C.(Org.) **Concreto Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2 v., v.1, p. 585-614. 2011.

PERONI, R. **Identificação macroscópica de rochas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia de Minas. Geologia de Engenharia I. Apostila de aula. 2003. Disponível em: <http://www.lapes.ufrgs.br/discipl_grad/geologia1/peroni/apostilas/9a_sedimentares_2003.pdf>. Acesso em: 20 fev.2011.

PETRÓLEO no Espírito Santo. Disponível: <http://www.sedes.es.gov.br/default.asp?arq=petroleo_es>. Acesso em 13/06/2010.

PETROBRAS. **Disposição do Cascalho de Perfuração onshore** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por polinefialho@hotmail.com em 09 jul. 2010.

PETROBRAS. **Exploração e Produção de petróleo e gás**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/atividades/exploracao-producao-petroleo-gas/>>. Acesso em: 01 fev. 2012.

PIRES, Patrício José Moreira. **Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para a produção de cerâmica vermelha**. 2009. 173 f.Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

PRISZKULNIK, S. Ações Físicas e químicas na durabilidade do Concreto. In: ISAIA, G. C.(Org.) **Concreto Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2 v., v.2, p. 1003-10028. 2011.

RASBAND, W. **Image J documentation**. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/index.html>>. Acesso em 05 nov. 2010.

REIS, J. **Environmental Control in Petroleum Engineering**. 1st Ed, Houston, Texas, Gulf Publishing. 1996.

RESOLUÇÕES do CONAMA (2006). Ministério do meio ambiente – MMA.Conselho nacional do meio ambiente - CONAMA. Livro – ISBN: 857738-039-4. Resolução 316.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T. **Projetos de Experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

ROCHA, J. C.;JOHN V. M.Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. Porto Alegre : **ANTAC**, 2003. — (Coleção Habitare, v. 4) 272p.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2^a ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1992, 408p.

- SCHAFFEL, Silvia Blajberg. **A questão ambiental na etapa de perfuração de poços marítimos de óleo e gás no Brasil**. 2002.147 f. Dissertação (Mestrado em ciências em planejamento energético). Programas de Pós-Graduação de engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/schaffelsb.pdf>>. Acesso em 19 ago. 2010.
- SOUZA, P. J. B.; LIMA, V. L. **Avaliação das técnicas de disposição de rejeitos da perfuração terrestre de poços de petróleo**. 2002.38f. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2002.
- SCRIVENER, K.L. *et al.* Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 9. p.1541–1547. 2004.
- SPENCE, R. D. **Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms**. Lewis Publications, Boca Raton, FL, 1991.
- STATSOFT, INC. Programa computacional **Statistica 7.0**. E.A.U. 2004
- SUSICH, M. L; SCHWENNE. Onshore Drilling Waste Management: Beneficial Reuse of Cuttings. **SPE Publication 86732**. SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, 29-31 March 2004, Calgary, Alberta, Canada.
- TAYLOR, H.F.W. **The Chemistry of Cements**. London & New York: Academic Press, 1964.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia do Petróleo**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.
- VAQUEIRO, R. L. C., ARARUNA Jr. J. T. e PIRES, P. J. M. The Use of Drilling Cuttings as Building Materials in Baiano, Brazil. **SPE Publication 98550**. SPE International Conference on Health, Safety, and environment in Oil and Gas Exploration and Production held in Abu Dhabi, U.A.E, 2-4 April 2006.
- VEIGA, L.F. **Estudo da Toxicidade Marinha de Fluidos de Perfuração de Poços de Óleo e Gás**. 1998. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense, UFF, Niterói, Rio de Janeiro, 1998.
- VEIL, J. A. Drilling Waste Management: Past, Present and Future. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, San Antonio, 2002; pp 541-551.
- VIEIRA, R.A.B., MENDES, M.P., VIEIRA, P.E., COSTA, L.A.R., TAGLIARI, C.V., BACELAR, A.P.& FEIJÓ, F.J., 1994. Bacias de Espírito Santo e Mucuri. **Boletim de Geociências da Petrobras** 8(1), 191-202.
- WAKIZAKA, Y., Ichikawa, K., Nakamura, Y. and Anan, S., 2001. Deterioration of concrete due to specific minerals. Proc. Aggregate 2001 –**Environment and Economy**, Vol.2, 331-338.
- WENTWORTH, C.K., A escale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**. USA, v. 30, 1922.
- WORLD Bank Group. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Onshore Oil and Gas Development. Washington, DC: The International Bank for Reconstruction and Development / **World Bank**. 2007.

B. Bibliografia referente a normas e procedimentos nacionais e internacionais

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM. Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes (**D4843-88**). 2009. Disponível em: <<http://enterprise.astm.org.ez43.periodicos.capes.gov.br/SUBSCRIPTION/search/sedl-search.html?query=%20D-4843&sub=enterprise>>. Acesso em: 22 jan. 2012.

_____. **Annual book of ASTM standards**. Section 4: Construction, v. 4. 08: Soil and rock; dimension stone; geosynthectis. Philadelphia. 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5429**. Planos de amostragem e procedimentos na inspeção por variáveis. C. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738** - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6023** - Informação e documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 6118** - Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 6457** - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 6459** - Solo - Determinação do Limite de liquidez. São Paulo, 1984.

_____. **NBR 7180** - Solo - Determinação do Limite de plasticidade. São Paulo, 1984.

_____. **NBR 7211** - Agregados para concreto. São Paulo, 2009.

_____. **NBR 7215** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7216** - Amostragem de Agregados. São Paulo, 1987.

_____. **NBR 7217** - Agregado - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7218** - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis em agregados. São Paulo, 1987.

_____. **NBR 7219** - Determinação do teor de materiais pulverulentos em agregados. São Paulo, 1987.

_____. **NBR 7222** - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7223** - Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7389-1** - Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 1: Agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7251** - Determinação da massa unitária no estado solto agregados. São Paulo, 1987.

- _____. **NBR 8522** - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 9778** - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 9780** - Peças de concreto para pavimentação, determinação da resistência à compressão. São Paulo, 1987.
- _____. **NBR 9781** - Especificação de resistência à compressão em pavimentos intertravados. São Paulo, 1987.
- _____. **NBR 9776** - Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. **NBR 9833** - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 10004** - Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10005** - Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006** - Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10007** - Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 11579** - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 11768** - Aditivos para concreto de cimento Portland - Especificação. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 14656** - Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 14724** - Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15577-3** - Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR NM 14** - Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR NM 15** - Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR NM 18** - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR NM 23** - Cimento Portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **NBR NM 26** – Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 30** – Agregados miúdos - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **NBR NM 43** - Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

138 Referências

_____. **NBR NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 49** - Agregado miúdo. Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52** - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53** - Agregado graúdo - Determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 65** – Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 76** – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 248** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2009.

Apêndices

Resultados individuais dos ensaios de massa específica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e absorção de água. Micrografias, análises químicas por EDS e difratogramas dos cascalhos e concretos.

**APÊNDICE A - RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS
CASCALHOS**

APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS CASCALHOS

A.1 – Análise de forma do grão

Figura A.1.1 - Gráfico referente à análise estatística dos grãos de esfericidade alta da NBR 7389 -1

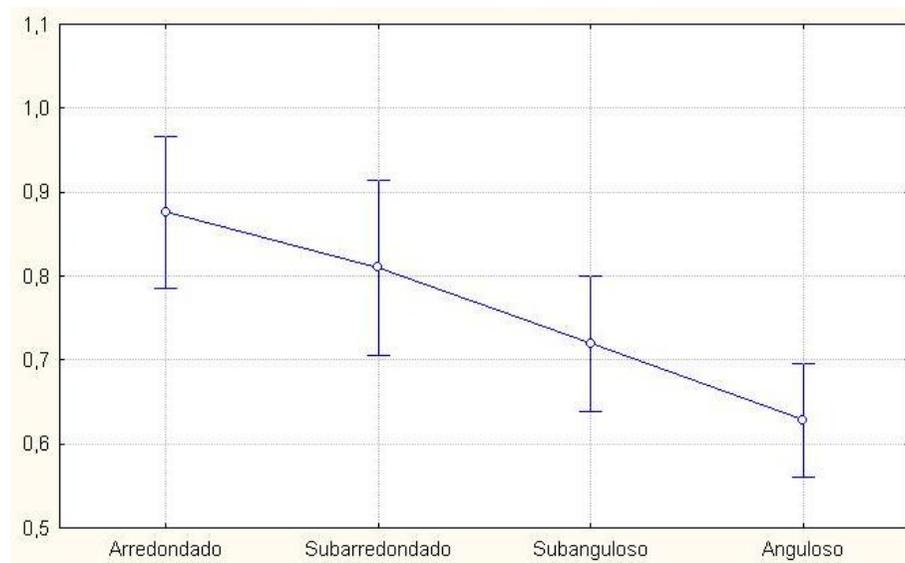


Figura A.1.2 - Gráfico referente à análise estatística dos grãos de esfericidade baixa da NBR 7389 -1

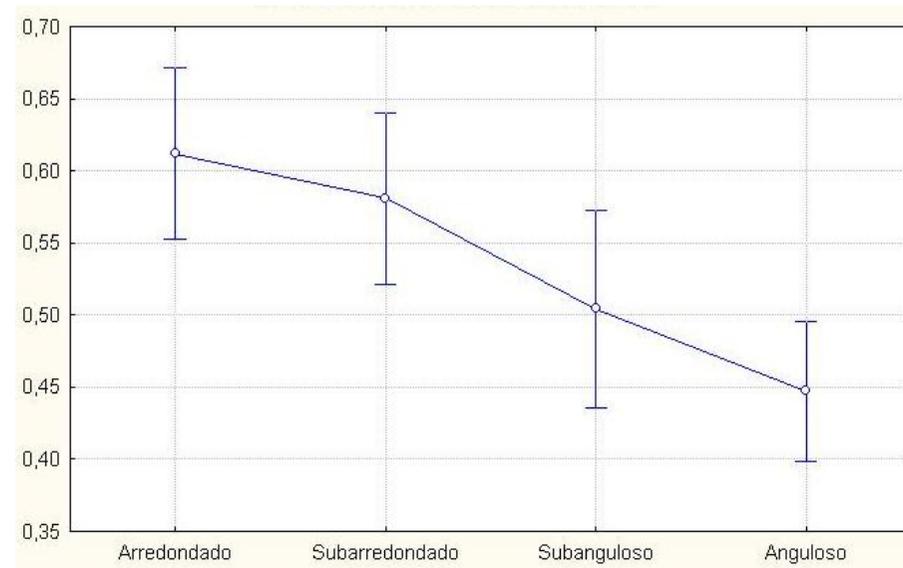
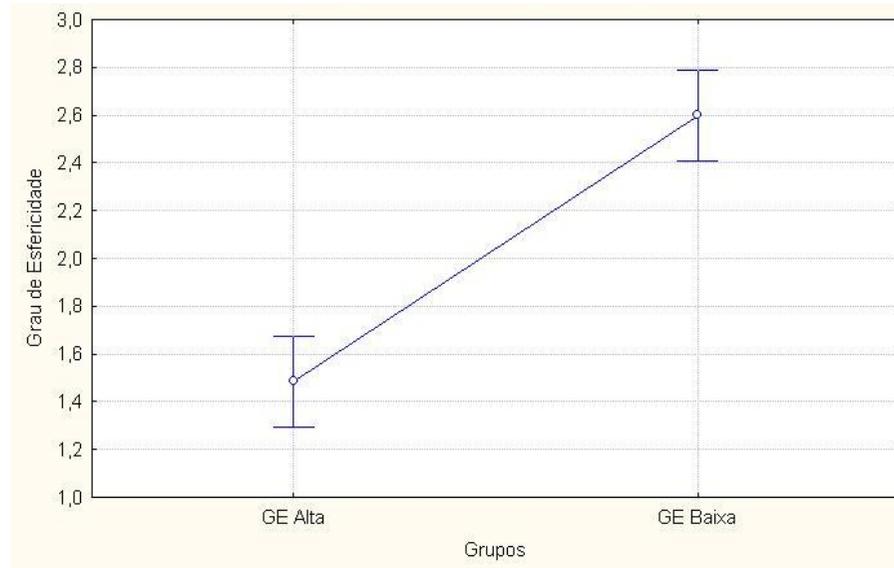


Figura A.1.3 - Gráfico referente à análise estatística do grau de esfericidade



**APÊNDICE B - RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS
CONCRETOS**

APÊNDICE B - RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS CONCRETOS

B. RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO e ENDURECIDO

B.1 Determinação da massa específica do concreto fresco

Tabela B.1.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação da massa específica do concreto fresco

DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA NO CONCRETO FRESCO PELO MÉTODO GRAVIMÉTRICO - NBR 9833 (ABNT, 2009)							
	Série	m1	m2	m3	Média	Desvio padrão	CV (%)
1	CR	2358,7	2344,3	2362,6	2355,2	7,87	0,00
2	S20	2371	2389,4	2368,9	2376,43	9,21	0,00
3	S50	2317,9	2335,3	2329,1	2327,43	7,20	0,00
4	S100	2318	2251,2	2230,9	2266,70	37,21	0,02
5	A5	2173	2212,4	2214,3	2199,90	19,04	0,01
6	A10	2265	2268	2361	2298,00	44,56	0,02
7	A15	2227,8	2273,9	2181,7	2227,80	37,64	0,02

B.2 Determinação da resistência à compressão axial

Tabela B.2.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para o concreto referência.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS – NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO CR		Moldagem - 11/10/2011							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
01	03	10,00	25100	A (cônica)	20,6	38,12905121	33,11	2,47	0,07
02	03	10,00	26000	A (cônica)	20,4	32,50345349			
03	03	9,90	25700	A (cônica)	20,4	32,12841364			
04	03	9,90	25500	A (cônica)	20,8	31,87838708			
05	03	9,90	25800	A (cônica)	20,6	32,25342693			
06	03	10,00	25400	A (cônica)	20,9	31,7533738			
07	07	9,90	30500	A (cônica)	19,7	38,12905121	38,23	0,72	0,02
08	07	9,94	29500	A (cônica)	19,7	36,87891839			
09	07	9,93	30800	A (cônica)	19,78	38,50409106			
10	07	9,94	30700	A (cônica)	19,71	38,37907778			
11	07	9,96	31200	A (cônica)	19,7	39,00414419			
12	07	9,87	30800	A (cônica)	19,7	38,50409106			
13	28	9,95	36500	A (cônica)	19,7	45,62984817	46,25	0,73	0,02
14	28	9,95	36300	A (cônica)	19,7	45,37982161			
15	28	9,95	37200	A (cônica)	19,7	46,50494115			
16	28	9,95	37700	A (cônica)	19,7	47,13000756			
17	28	9,95	36700	A (cônica)	19,7	45,87987474			
18	28	9,95	37600	A (cônica)	19,7	47,00499428			

Tabela B.2.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para o concreto S20

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS – NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO S 20		Moldagem - 14/10/2011							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
01	03	9,90	26000	A (cônica)	19,8	38,37907778	34,57	1,94	0,06
02	03	9,90	27400	A (cônica)	19,7	34,25363945			
03	03	9,90	27300	A (cônica)	19,5	34,12862617			
04	03	9,90	27400	A (cônica)	19,5	34,25363945			
05	03	9,90	26300	A (cônica)	19,8	32,87849334			
06	03	9,90	26800	A (cônica)	19,6	33,50355975			
07	07	9,94	30700	A (cônica)	19,8	38,37907778	36,27	1,72	0,05
08	07	9,93	29800	A (cônica)	19,85	37,25395823			
09	07	9,93	26900	A (cônica)	19,7	33,62857304			
10	07	9,92	29300	A (cônica)	19,75	36,62889182			
11	07	9,92	27900	A (cônica)	19,7	34,87870586			
12	07	9,91	29500	A (cônica)	19,8	36,87891839			
13	28	9,95	35300	A (cônica)	19,7	44,12968878	45,19	1,46	0,03
14	28	9,95	36400	A (cônica)	19,7	45,50483489			
15	28	9,95	35700	A (cônica)	19,7	44,62974191			
16	28	9,95	34600	A (cônica)	19,7	43,2545958			
17	28	9,95	37400	A (cônica)	19,7	46,75496772			
18	28	9,95	37500	A (cônica)	19,7	46,879981			

Tabela B.2.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para o concreto S50

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO S 50			Moldagem - 24/10/2011						
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
01	03	9,95	25400	A (cônica)	19,9	31,7533738	30,75	0,94	0,03
02	03	9,98	25300	A (cônica)	19,8	31,62836051			
03	03	9,93	23400	A (cônica)	19,8	29,25310814			
04	03	9,90	24300	A (cônica)	19,7	30,37822769			
05	03	9,91	24300	A (cônica)	19,9	30,37822769			
06	03	9,94	24900	A (cônica)	19,7	31,12830738			
07	07	9,96	30600	A (cônica)	20	38,25406449	37,84	0,42	0,01
08	07	9,94	30100	A (cônica)	19,8	37,62899808			
09	07	9,96	30600	A (cônica)	19,9	38,25406449			
10	07	9,92	30500	A (cônica)	19,75	38,12905121			
11	07	9,94	29900	A (cônica)	19,9	37,37897152			
12	07	9,91	29900	A (cônica)	19,8	37,37897152			
13	28	9,95	35600	A (cônica)	19,7	44,50472863	43,57	0,90	0,02
14	28	9,95	35900	A (cônica)	19,7	44,87976848			
15	28	9,95	34500	A (cônica)	19,7	43,12958252			
16	28	9,95	34600	A (cônica)	19,7	43,2545958			
17	28	9,95	34200	A (cônica)	19,7	42,75454267			
18	28	9,95	34300	A (cônica)	19,7	42,87955595			

Tabela B.2.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para o concreto S100

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS- NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO S 100		Moldagem - 14/10/2011							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
01	03	9,90	25500	A (cônica)	19,9	31,87838708	32,19	0,71	0,02
02	03	9,90	26600	A (cônica)	19,7	33,25353319			
03	03	9,90	26000	A (cônica)	19,9	32,50345349			
04	03	9,90	25600	A (cônica)	19,7	32,00340036			
05	03	10,00	24900	A (cônica)	19,9	31,12830738			
06	03	9,90	25900	A (cônica)	19,5	32,37844021			
07	07	9,94	27900	A (cônica)	19,9	34,87870586	35,21	0,98	0,03
08	07	9,94	27400	A (cônica)	19,98	34,25363945			
09	07	9,93	27400	A (cônica)	19,9	34,25363945			
10	07	9,93	29400	A (cônica)	19,8	36,7539051			
11	07	9,97	28700	A (cônica)	19,65	35,87881212			
12	07	9,89	28200	A (cônica)	19,7	35,25374571			
13	28	9,95	35100	A (cônica)	19,7	43,87966221	43,34	1,40	0,03
14	28	9,95	36200	A (cônica)	19,7	45,25480832			
15	28	9,95	35300	A (cônica)	19,7	44,12968878			
16	28	9,95	33000	A (cônica)	19,7	41,25438328			
17	28	9,95	34400	A (cônica)	19,7	43,00456924			
18	28	9,95	34000	A (cônica)	19,7	42,5045161			

Tabela B.2.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para o concreto A5

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO A 5			Moldagem - 21/10/2011						
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
01	03	9,91	23100	A (cônica)	19,8	28,87806829	28,13	0,69	0,02
02	03	9,95	21500	A (cônica)	19,9	26,87785577			
03	03	9,93	22600	A (cônica)	19,9	28,25300188			
04	03	9,99	22300	A (cônica)	19,9	27,87796203			
05	03	9,90	22700	A (cônica)	19,9	28,37801516			
06	03	9,99	22800	A (cônica)	19,9	28,50302845			
07	07	10,00	28700	A (cônica)	19,75	35,87881212			
08	07	9,93	28900	A (cônica)	19,78	36,12883869			
09	07	9,96	19700	A (cônica)	19,7	24,62761668			
10	07	9,92	19700	A (cônica)	19,8	24,62761668			
11	07	9,92	28600	A (cônica)	19,8	35,75379884			
12	07								
13	28	9,95	32600	A (cônica)	19,7	40,75433015	39,44	1,68	0,04
14	28	9,95	31200	A (cônica)	19,7	39,00414419			
15	28	9,95	31400	A (cônica)	19,7	39,25417076			
16	28	9,95	32400	A (cônica)	19,7	40,50430358			
17	28	9,95	29100	A (cônica)	19,7	36,37886525			
18	28	9,95	32600	A (cônica)	19,7	40,75433015			

Tabela B.2.6 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para o concreto A10

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO A 10		Moldagem - 13/10/2011							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
01	03	10,00	26800	A (cônica)	19,87	33,50355975	32,96	0,44	0,01
02	03	9,90	26800	A (cônica)	19,88	33,50355975			
03	03	9,90	26200	A (cônica)	19,78	32,75348006			
04	03	9,90	26000	A (cônica)	19,8	32,50345349			
05	03	9,90	26100	A (cônica)	19,7	32,62846677			
06	03	9,90	26300	A (cônica)	19,9	32,87849334			
07	07	9,93	27600	A (cônica)	19,75	34,50366601	33,40	1,14	0,03
08	07	9,96	27000	A (cônica)	19,8	33,75358632			
09	07	9,94	27000	A (cônica)	19,65	33,75358632			
10	07	9,95	25800	A (cônica)	19,7	32,25342693			
11	07	9,92	25400	A (cônica)	19,84	31,7533738			
12	07	9,93	27500	A (cônica)	19,8	34,37865273			
13	28	9,95	31200	A (cônica)	19,7	39,00414419	40,38	1,26	0,03
14	28	9,95	33500	A (cônica)	19,7	41,87944969			
15	28	9,95	33100	A (cônica)	19,7	41,37939656			
16	28	9,95	31000	A (cônica)	19,7	38,75411762			
17	28	9,95	32500	A (cônica)	19,7	40,62931686			
18	28	9,95	32500	A (cônica)	19,7	40,62931686			

Tabela B.2.7 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para o concreto A15

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO A 15			Moldagem - 24/10/2011						
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
01	03	9,93	22700	A (cônica)	19,7	28,37801516	28,36	0,84	0,03
02	03	9,94	22000	A (cônica)	19,8	27,50292219			
03	03	9,95	21900	A (cônica)	19,8	27,3779089			
04	03	9,95	22600	A (cônica)	19,8	28,25300188			
05	03	9,94	23400	A (cônica)	19,8	29,25310814			
06	03	9,95	23500	A (cônica)	19,8	29,37812143			
07	07	9,98	26700	A (cônica)	19,7	33,37854647			
08	07	9,99	26700	A (cônica)	19,7	33,37854647			
09	07	9,98	26100	A (cônica)	19,7	32,62846677			
10	07	9,95	27000	A (cônica)	19,7	33,75358632			
11	07	9,99	26300	A (cônica)	19,7	32,87849334			
12	07	9,99	26200	A (cônica)	19,7	32,75348006	37,48	1,33	0,04
13	28	9,95	30900	A (cônica)	19,7	38,62910434			
14	28	9,95	31300	A (cônica)	19,7	39,12915747			
15	28	9,95	28800	A (cônica)	19,7	36,00382541			
16	28	9,95	30500	A (cônica)	19,7	38,12905121			
17	28	9,95	29500	A (cônica)	19,7	36,87891839			
18	28	9,95	28900	A (cônica)	19,7	36,12883869			

B.3 Determinação de resistência à tração por compressão diametral

Tabela B.3.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para o concreto referência.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS – NBR 5739 (ABNT, 2007).

TRAÇO CR

CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
1	28	9,95	10400	A (cônica)	19,7	3,25	3,41	0,15	0,04
2	28	9,95	11300	A (cônica)	19,7	3,53			
3	28	9,95	10800	A (cônica)	19,7	3,38			
4	28	9,95	11300	A (cônica)	19,7	3,53			
5	28	9,95	11400	A (cônica)	19,7	3,56			
6	28	9,95	10300	A (cônica)	19,7	3,22			

Tabela B.3.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para o concreto S20.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).

TRAÇO S 20

CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
1	28	9,95	7700	A (cônica)	19,7	2,41	3,12	0,49	0,16
2	28	9,95	9200	A (cônica)	19,7	2,88			
3	28	9,95	12000	A (cônica)	19,7	3,75			
4	28	9,95	11100	A (cônica)	19,7	3,47			
5	28	9,95	9200	A (cônica)	19,7	2,88			
6	28	9,95	10700	A (cônica)	19,7	3,34			

154 Apêndice

Tabela B.3.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para o concreto S50.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS – NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO S 50									
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
1	28	9,95	10700	A (cônica)	19,7	3,34	3,31	0,41	0,12
2	28	9,95	11300	A (cônica)	19,7	3,53			
3	28	9,95	10800	A (cônica)	19,7	3,38			
4	28	9,95	11500	A (cônica)	19,7	3,59			
5	28	9,95	11200	A (cônica)	19,7	3,50			
6	28	9,95	8000	A (cônica)	19,7	2,50			

Tabela B.3.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para o concreto S100.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO S 100									
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
1	28	9,95	10400	A (cônica)	19,7	3,25	3,26	0,20	0,06
2	28	9,95	9700	A (cônica)	19,7	3,03			
3	28	9,95	10900	A (cônica)	19,7	3,41			
4	28	9,95	11000	A (cônica)	19,7	3,44			
5	28	9,95	9600	A (cônica)	19,7	3,00			
6	28	9,95	11000	A (cônica)	19,7	3,44			

Tabela B.3.5 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para o concreto A5.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO A5									
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
1	28	9,95	11700	A (cônica)	19,7	3,66	3,60	0,21	0,06
2	28	9,95	11200	A (cônica)	19,7	3,50			
3	28	9,95	12000	A (cônica)	19,7	3,75			
4	28	9,95	11900	A (cônica)	19,7	3,72			
5	28	9,95	10300	A (cônica)	19,7	3,22			
6	28	9,95	12000	A (cônica)	19,7	3,75			

Tabela B.3.6 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para o concreto A10.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).									
TRAÇO A 10									
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
1	28	9,95	11200	A (cônica)	19,7	3,50	3,11	0,27	0,09
2	28	9,95	8900	A (cônica)	19,7	2,78			
3	28	9,95	9300	A (cônica)	19,7	2,91			
4	28	9,95	10700	A (cônica)	19,7	3,34			
5	28	9,95	9600	A (cônica)	19,7	3,00			
6	28	9,95	10000	A (cônica)	19,7	3,13			

156 Apêndice

Tabela B.3.7 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para o concreto A15.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS - NBR 5739 (ABNT, 2007).

TRAÇO A15

CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio Padrão	CV(%)
1	28	9,95	9200	A (cônica)	19,7	2,88	3,18	0,19	0,06
2	28	9,95	9800	A (cônica)	19,7	3,06			
3	28	9,95	10500	A (cônica)	19,7	3,28			
4	28	9,95	10300	A (cônica)	19,7	3,22			
5	28	9,95	10400	A (cônica)	19,7	3,25			
6	28	9,95	10900	A (cônica)	19,7	3,41			

B.4 Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão

Tabela B.4.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão para os concretos.

ENSAIO DE MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE - NBR 8522 (ABNT, 2008)												
CP N°	Série	Idade de Ruptura (dias)	Data do ensaio	Resistência à compressão * (fc) em MPa	Deformação em mm	Resistência efetiva à compressão (fcef) em MPa	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Módulo Estático de Elasticidade (Ec) em **GPa	Ec média	Desvio padrão	CV (%)
1	CR	28	28/11/2011	46,25	0.0482	45.42	9,95	19,7	29,48			
2	CR	28	28/11/2011	46,25	0.0484	47.3	9,95	19,7	34,13	32,46	2,59	0,08
3	CR	28	28/11/2011	46,25		42.62	9,95	19,7	33,78			
4	S20	28	30/11/2011	45,2	0.0462	47,62	9,95	19,7	31,82			
5	S20	28	30/11/2011	45,2	0,0457	38,96	9,95	19,7	31,93	31,87	7,88	0,25
6	S20	28	30/11/2011	45,2	0.0447	39,63	9,95	19,7	45,52			
7	S50	28	05/12/2011	43,6	0,0486	47,78	9,95	19,7	28,31			
8	S50	28	05/12/2011	43,6	0,0501	37,39	9,95	19,7	31,09	29,77	1,40	0,05
9	S50	28	05/12/2011	43,6	0,0535	43,87	9,95	19,7	29,92			
10	S100	28	30/11/2011	43,34	0.0526	38,51	9,95	19,7	28,02			
11	S100	28	30/11/2011	43,34	0.0511	42,87	9,95	19,7	30,1	29,99	1,91	0,06
12	S100	28	30/11/2011	43,34	0.0446	44,56	9,95	19,7	31,84			
13	A5	28	05/12/2011	39,44	0.0441	34,67	9,95	19,7	30,27			
14	A5	28	05/12/2011	39,44	0,045	38,42	9,95	19,7	29,32	29,71	0,50	0,02
15	A5	28	05/12/2011	39,44	0,0504	37,75	9,95	19,7	29,55			
16	A10	28	30/11/2011	40,38	0.0454	40,75	9,95	19,7	29,88			
17	A10	28	30/11/2011	40,38	0.0422	40,94	9,95	19,7	32	31,57	1,53	0,05
18	A10	28	30/11/2011	40,38	0,0421	40,43	9,95	19,7	32,85			
19	A15	28	05/12/2011	37,5	0,0582	39,89	9,95	19,7	27,48			
20	A15	28	05/12/2011	37,5	0.0576	36,59	9,95	19,7	28,75	27,82	0,81	0,03
21	A15	28	05/12/2011	37,5	0.0598	37,55	9,95	19,7	27,24			

158 Apêndice

B.5 Determinação da Absorção de água

Tabela B.5.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da absorção de água para o concreto referência.

Ensaio de determinação da absorção de água - NBR 9778 (ABNT, 2009)						
Concreto Referência						
			Resultados	Média	Desvio padrão	CV (%)
Nº CP	Seco (Ms)	Úmido (Mh)	A(%)	4,44	0,38	0,09
1	3598,1	3751,6	4,266140463			
2	3583,2	3746	4,543424872			
3	3579,2	3751,9	4,825100581			
4	3598,4	3771,9	4,821587372			
5	3597,4	3734,9	3,822204926			
6	3583,2	3739,9	4,373185979			

Tabela B.5.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da absorção de água para o concreto S20.

Ensaio de determinação da absorção de água - NBR 9778 (ABNT, 2009)						
S20						
			Resultados	Média	Desvio padrão	CV (%)
Nº CP	Seco (Ms)	Úmido (Mh)	A(%)	5,45	0,07	0,01
1	3527,7	3720,1	5,453979			
2	3588,2	3778,8	5,311856			
3	3554	3749,4	5,49803			
4	3573,8	3767,6	5,422799			
5	3570,2	3767,7	5,531903			
6	3553,3	3747,5	5,465342			

Tabela B.5.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da absorção de água para o concreto S50.

Ensaio de determinação da absorção de água - NBR 9778 (ABNT, 2009)						
S50						
			Resultados	Média	Desvio padrão	CV (%)
Nº CP	Seco (Ms)	Úmido (Mh)	A(%)	4,75	0,28	0,06
1	3530,7	3706,4	4,97635			
2	3542,1	3723,7	5,126902			
3	3568,9	3735	4,654095			
4	3582,4	3750,4	4,689594			
5	3611,6	3765,2	4,252963			
6	3566,9	3738,2	4,80249			

Tabela B.5.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da absorção de água para o concreto S100.

Ensaio de determinação da absorção de água - NBR 9778 (ABNT, 2009)						
S100						
			Resultados	Média	Desvio padrão	CV (%)
Nº CP	Seco (Ms)	Úmido (Mh)	A(%)	5,26	0,34	0,07
1	3613,6	3822,8	5,789241			
2	3592,7	3789,8	5,486125			
3	3590,2	3780,6	5,303326			
4	3610,4	3783,1	4,783404			
5	3567,6	3756,5	5,294876			
6	3679,8	3859,2	4,875265			

160 Apêndice

Tabela B.5.5 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da absorção de água para o concreto A5.

Ensaio de determinação da absorção de água - NBR 9778 (ABNT, 2009)						
A5						
			Resultados	Média	Desvio padrão	CV (%)
Nº CP	Seco (Ms)	Úmido (Mh)	A(%)	6,26	0,58	0,09
1	3410,9	3628,6	6,38248			
2	3409,1	3630,8	6,503183			
3	3496	3673,8	5,085812			
4	3433,3	3640,2	6,026272			
5	3441,1	3670,9	6,678097			
6	3432,7	3668,2	6,860489			

Tabela B.5.6 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da absorção de água para o concreto A10.

Ensaio de determinação da absorção de água - NBR 9778 (ABNT, 2009)						
A10						
			Resultados	Média	Desvio padrão	CV (%)
Nº CP	Seco (Ms)	Úmido (Mh)	A(%)	5,70	0,13	0,02
1	3495,7	3688,4	5,512487			
2	3467,8	3660,6	5,559721			
3	3443,7	3643	5,78738			
4	3465,4	3669,4	5,886766			
5	3490,7	3691	5,738104			
6	3472,3	3669,8	5,687873			

Tabela B.5.7 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da absorção de água para o concreto A15.

Ensaio de determinação da absorção de água - NBR 9778 (ABNT, 2009)						
A15						
			Resultados	Média	Desvio padrão	CV (%)
Nº CP	Seco (Ms)	Úmido (Mh)	A(%)			
1	3450,6	3593,2	4,132615	4,11	0,50	0,12
2	3471,4	3594,8	3,554762			
3	3507,1	3677,1	4,84731			
4	3486,7	3611,7	3,585052			
5	3464,3	3626,4	4,679156			
6	3480,8	3614,7	3,846817			

B.6 Micrografias do concreto referência

Figura B.6.1 - CR – idade 3 dias – ampliação 100x

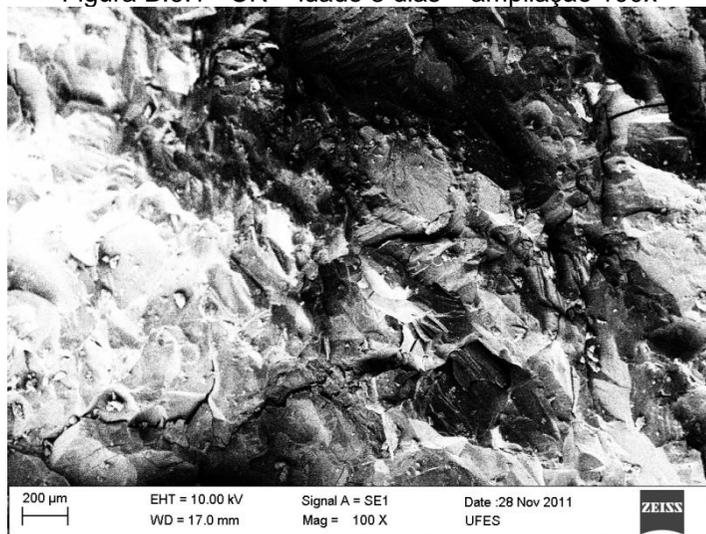


Figura B.6.2 - CR – idade 3 dias – ampliação 300x



Figura B.6.3 - CR – idade 3 dias – ampliação 3000x

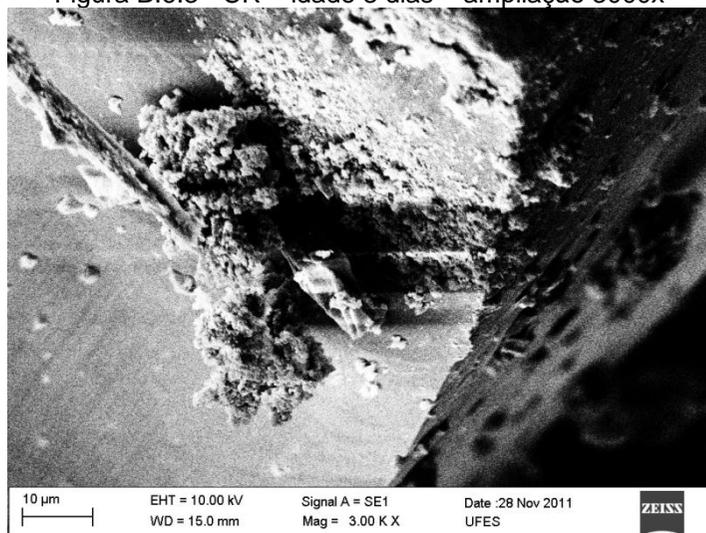


Figura B.6.4 - CR – idade 3 dias – ampliação 5000x

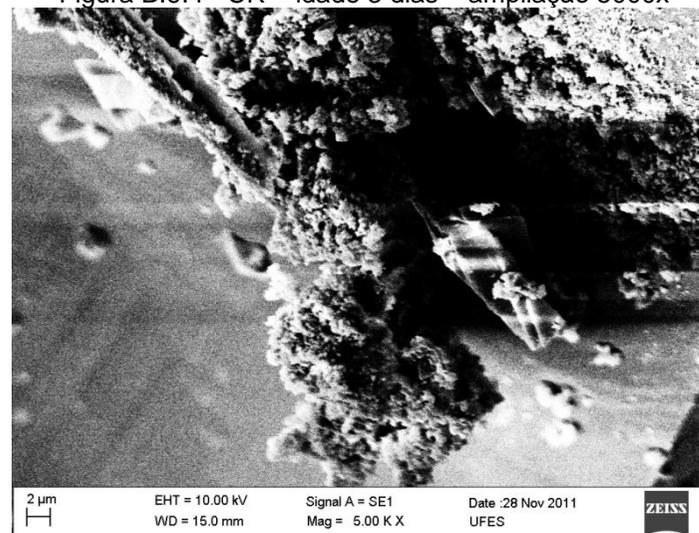


Figura B.6.5 - CR – idade 7 dias – ampliação 100x

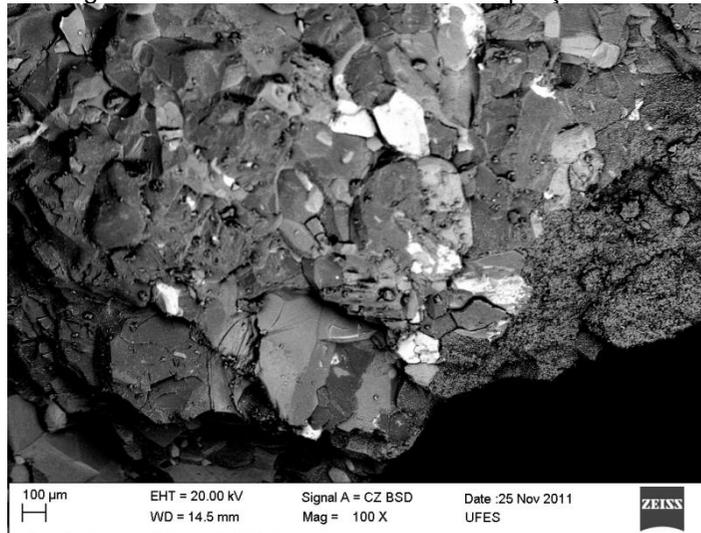


Figura B.6.6 - CR – idade 7 dias – ampliação 300x

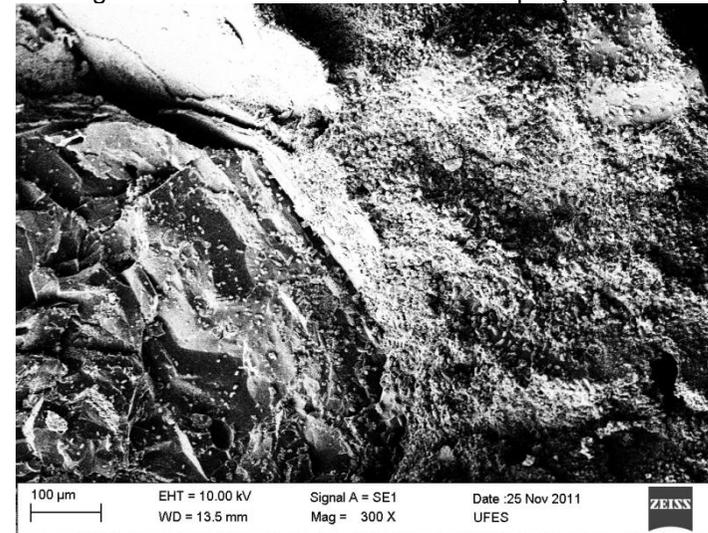


Figura B.6.7 - CR – idade 7 dias – ampliação 2000x

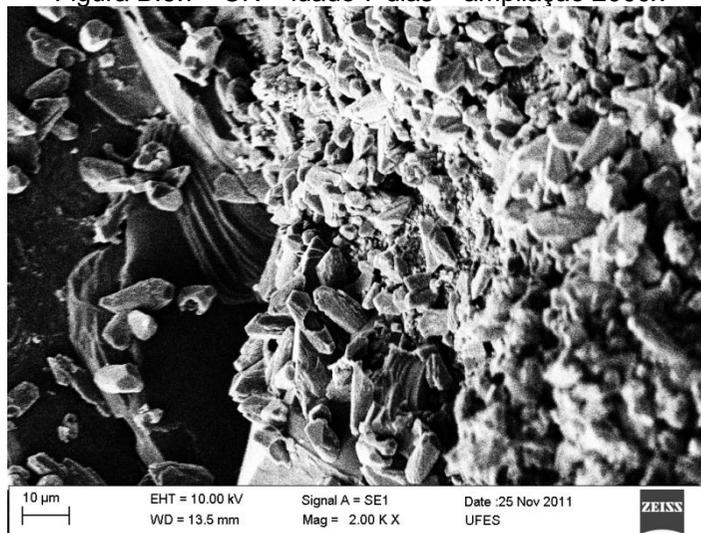


Figura B.6.8 - CR – idade 7 dias – ampliação 5000x

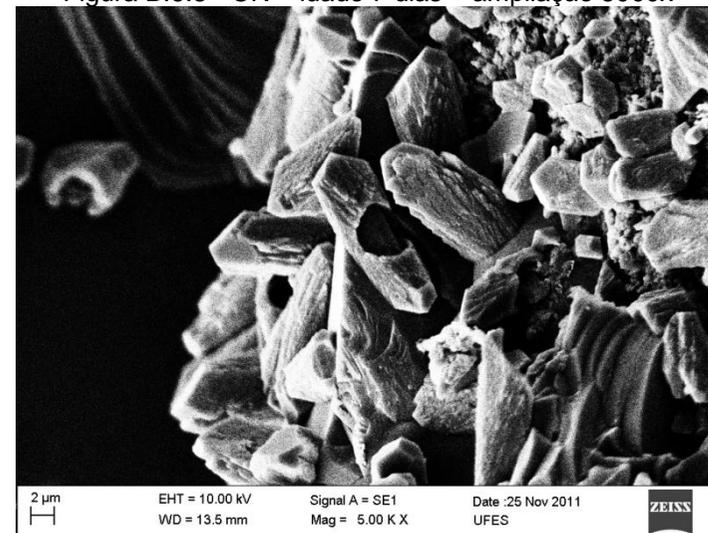


Figura B. 6.9 – CR – idade 28 dias – 100x

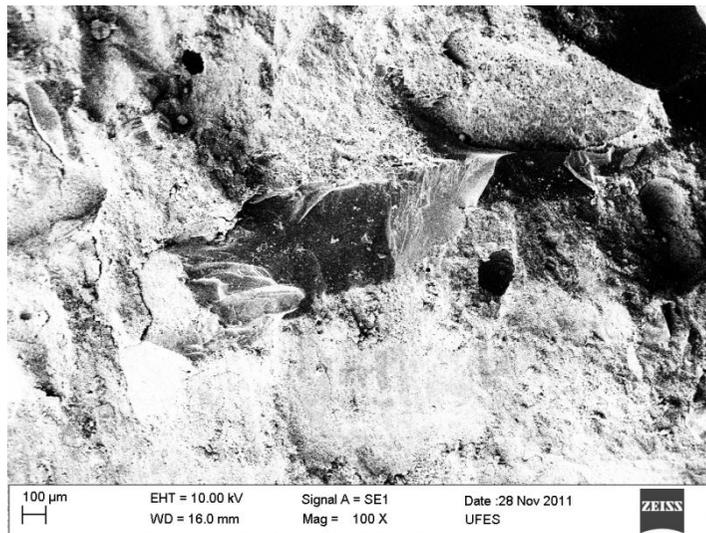


Figura B.6.10 - CR – idade 28 dias – ampliação 300x

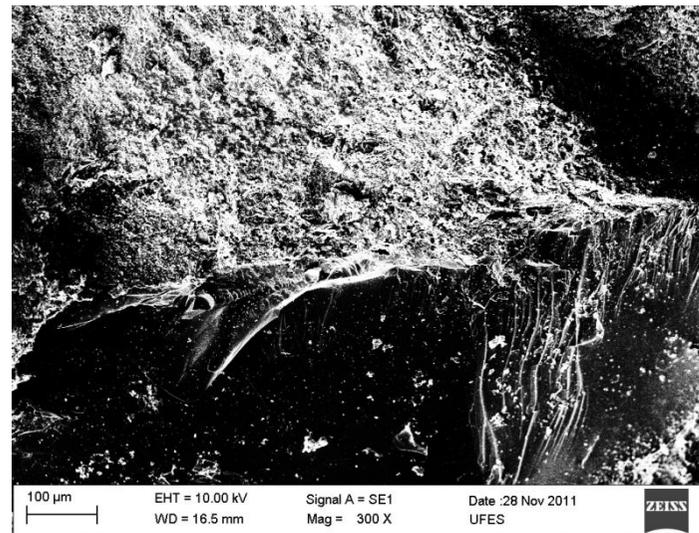


Figura B.6.11 - CR – idade 28 dias – ampliação 2000x

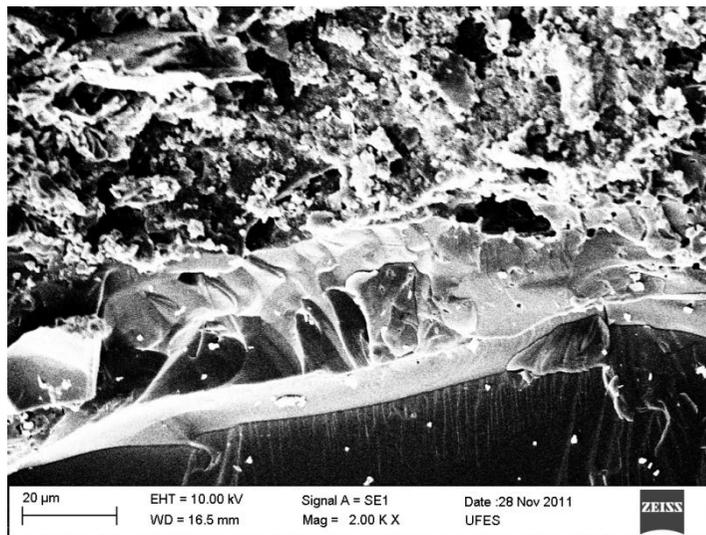


Figura B.6.12 - CR – idade 28 dias – ampliação 5000x



B.7 Micrografias e análises químicas por EDS dos concretos com substituição do CAP I

Figura B.7.1 - S 20 – idade 3 dias – ampliação 100x

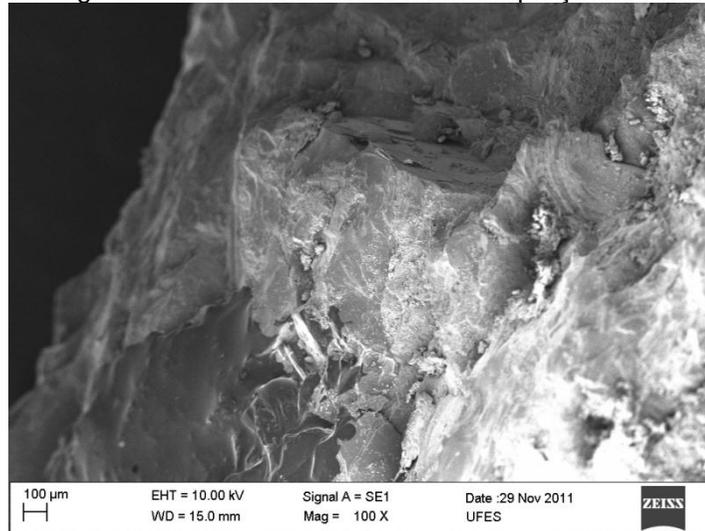


Figura B.7.2 - S 20 – idade 3 dias – ampliação 300x

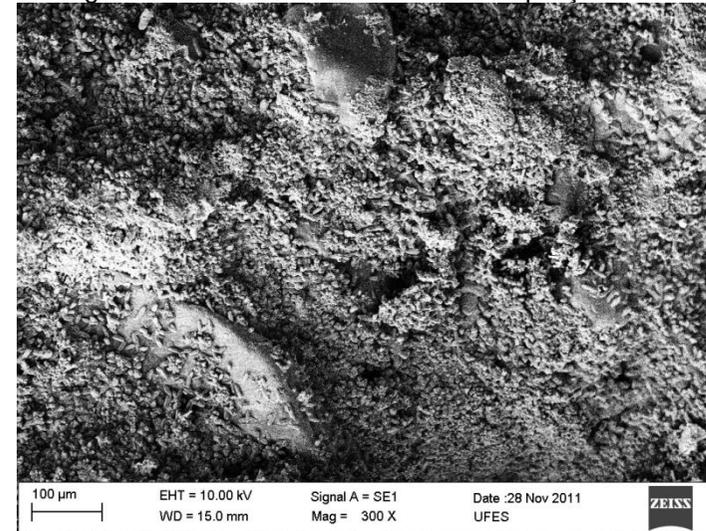


Figura B.7.3 - S 20 – idade 3 dias – ampliação 2000x

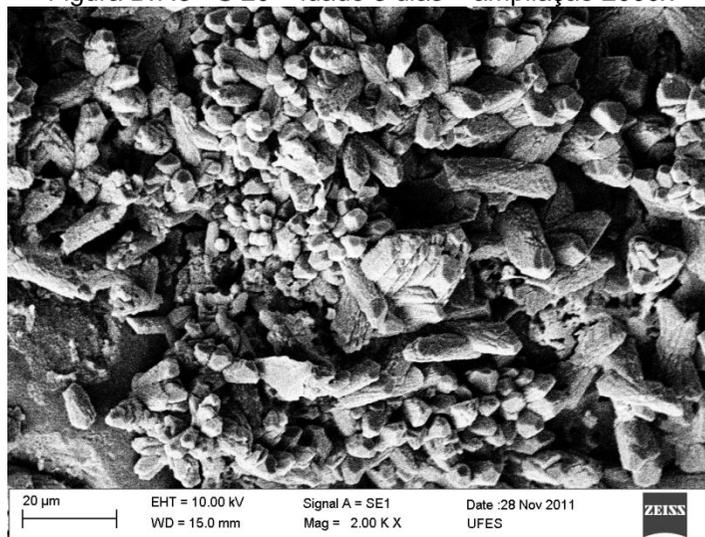


Figura B.7.4 - S 20 – idade 3 dias – ampliação 5000x

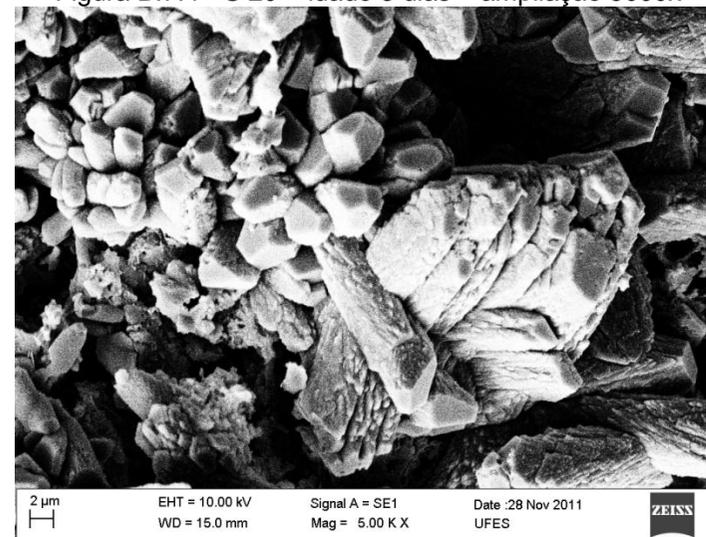


Figura B.7.5 - S 20 – idade 3 dias - espectro da Figura B.7.4

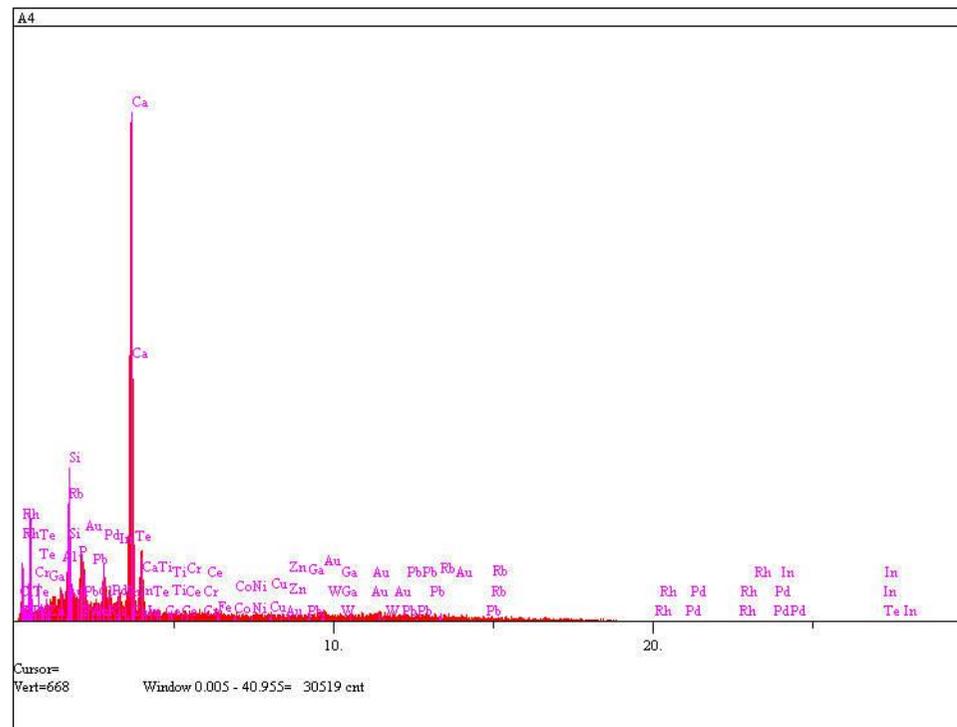


Figura B.7.6 - S 20 – idade 3 dias – EDS da Figura B.7.4

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	
C	Ka	7.86	0.793	19.061	7.938	wt.%
N	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%
O	Ka	14.06	1.060	46.009	25.524	wt.%
F	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%
Al	Ka	1.91	0.391	0.451	0.422	wt.%
Si	Ka	22.77	1.350	4.452	4.336	wt.%
P	Ka	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%
Cl	Ka	0.45	0.190	0.077	0.095	wt.%
K	Ka	3.49	0.529	0.548	0.743	wt.%
Ca	Ka	138.01	3.323	23.132	32.146	wt.%
Ti	Ka	1.16	0.305	0.211	0.350	wt.%
V	Ka	0.26	0.146	0.048	0.085	wt.%
Cr	Ka	0.64	0.226	0.118	0.213	wt.%
Fe	Ka	1.42	0.337	0.299	0.580	wt.%
Co	Ka	0.58	0.216	0.134	0.275	wt.%
Ni	Ka	0.37	0.173	0.097	0.198	wt.%
Cu	Ka	1.34	0.327	0.400	0.881	wt.%
Zn	Ka	0.22	0.132	0.076	0.173	wt.%
Ga	Ka	0.47	0.193	0.196	0.473	wt.%
Rb	La	4.10	0.573	0.772	2.287	wt.%
Rh	La	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%
Pd	La	7.38	0.768	1.092	4.031	wt.%
In	La	0.13	0.103	0.027	0.108	wt.%
Te	La	0.00	0.000	0.000	0.000	wt.%
Ce	La	0.28	0.150	0.081	0.394	wt.%
W	La	0.62	0.222	0.315	2.006	wt.%
Au	La	2.08	0.407	1.458	9.954	wt.%
Pb	La	1.01	0.284	0.945	6.788	wt.%
				100.000	100.000	wt.%
						Total
kV		20.0				
Takeoff Angle		35.0°				
Elapsed Livetime		50.0				

Figura B.7.7 - S 20 – idade 7 dias – ampliação 100x

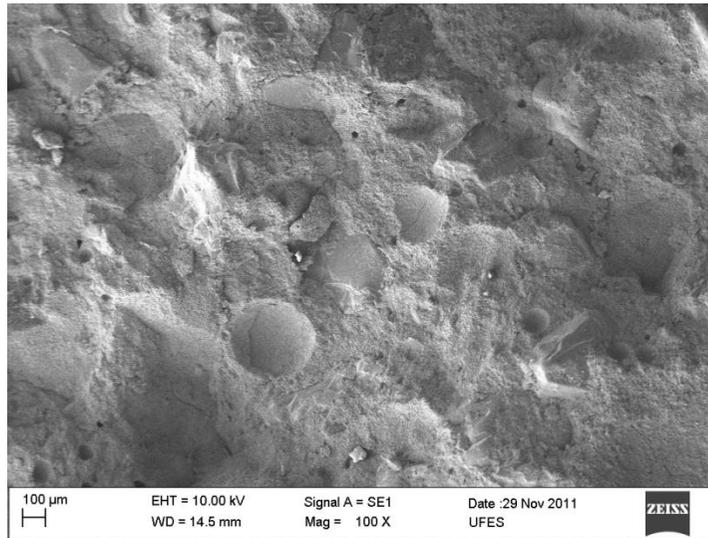


Figura B.7.8 - S 20 – idade 7 dias – ampliação 300x

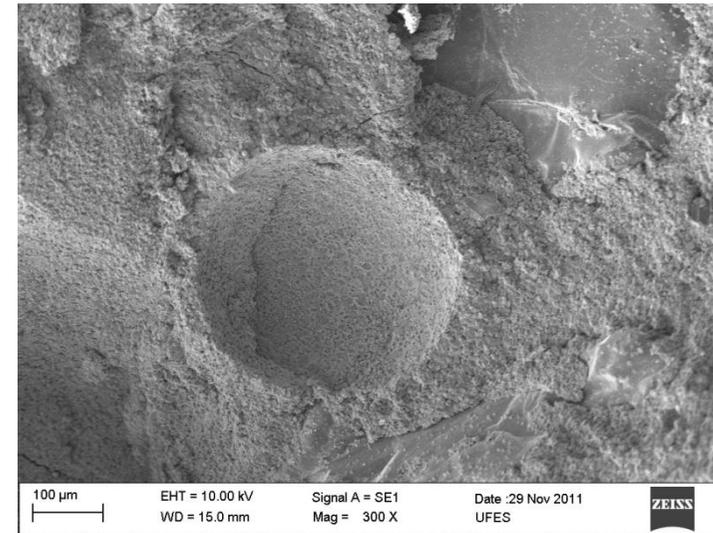


Figura B.7.9 - S 20 – idade 7 dias – ampliação 300x

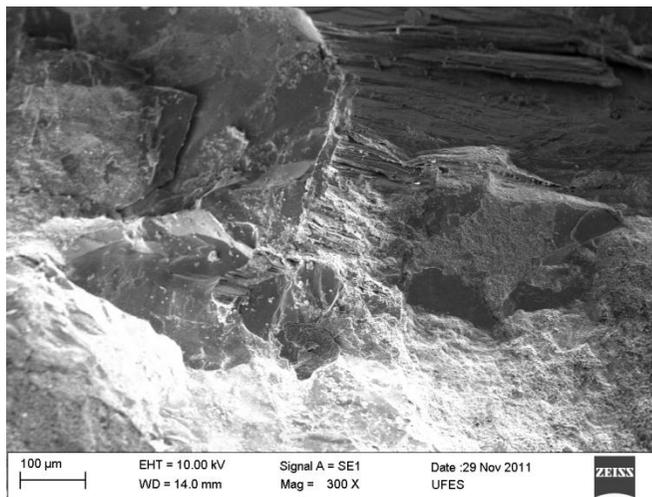


Figura B.7.10 - S 20 – idade 7 dias – ampliação 2000x

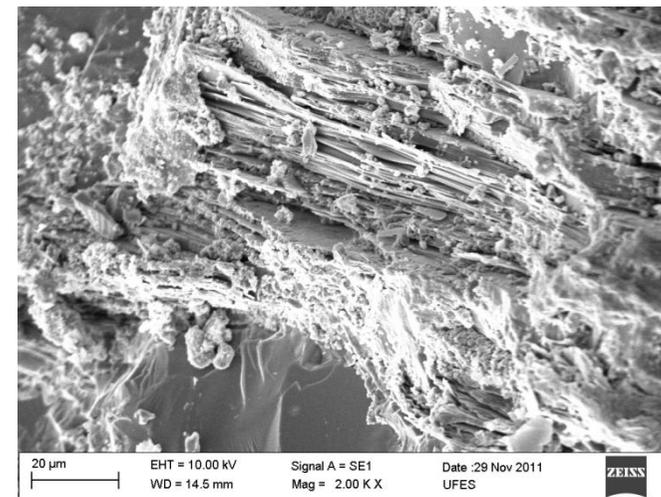


Figura B.7.11 - S 20 – idade 7 dias – ampliação 2000x

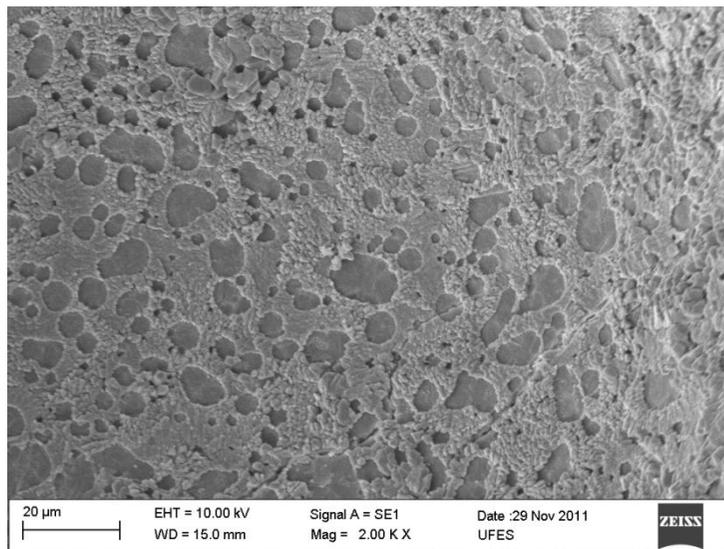


Figura B.7.12 - S 20 – idade 7 dias – ampliação 5000x

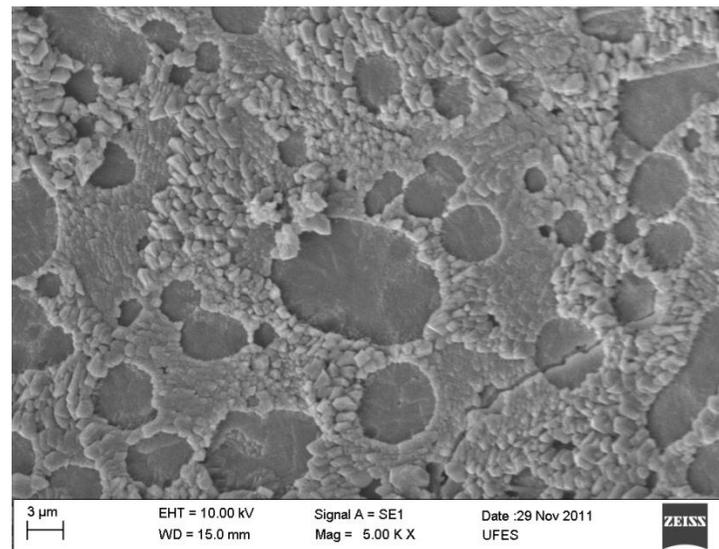


Figura B.7.13 - S 20 – idade 7 dias – ampliação 5000x

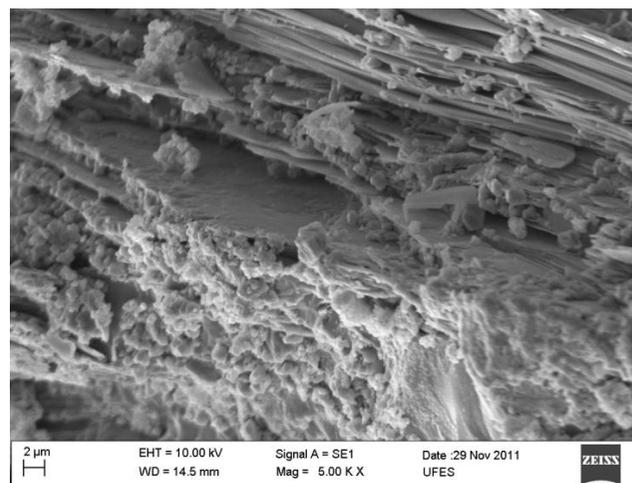


Figura B.7.14 - S 20 – idade 7 dias - espectro da Figura B.7.12

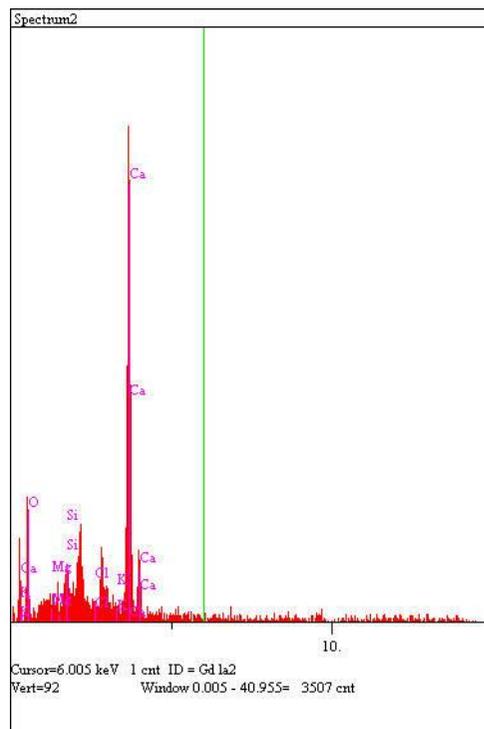


Figura B.7.15 - S 20 – idade 7 dias – EDS da Figura B.7.12

El.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc	
O	Ka	3.15	0.502	78.240	59.602	wt.%
Mg	Ka	0.06	0.068	0.149	0.173	wt.%
Al	Ka	0.06	0.070	0.117	0.150	wt.%
Si	Ka	1.06	0.291	1.607	2.149	wt.%
Cl	Ka	0.06	0.068	0.064	0.109	wt.%
K	Ka	0.20	0.126	0.197	0.367	wt.%
Ca	Ka	17.14	1.171	19.626	37.451	wt.%
				100.000	100.000	wt.% Total
kV		20.0				
Takeoff Angle		35.0°				
Elapsed Livetime		50.0				

Figura B.7.16 - S 20 – idade 28 dias – ampliação 100x

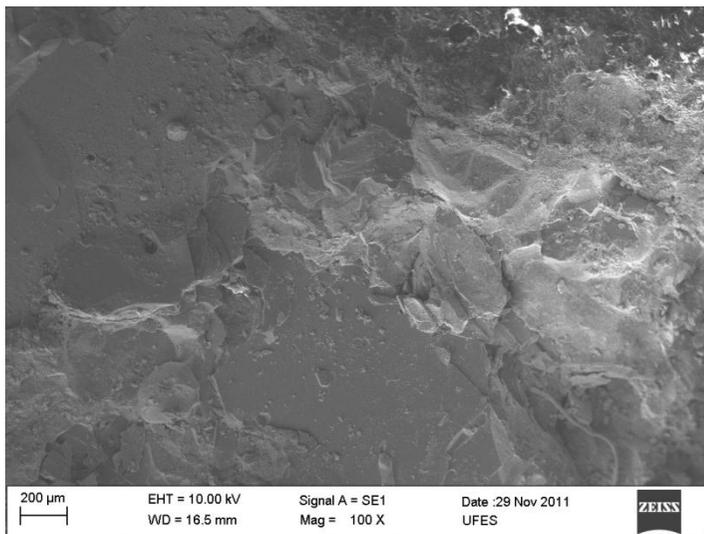


Figura B.7.17 - S 20 – idade 28 dias – ampliação 300x

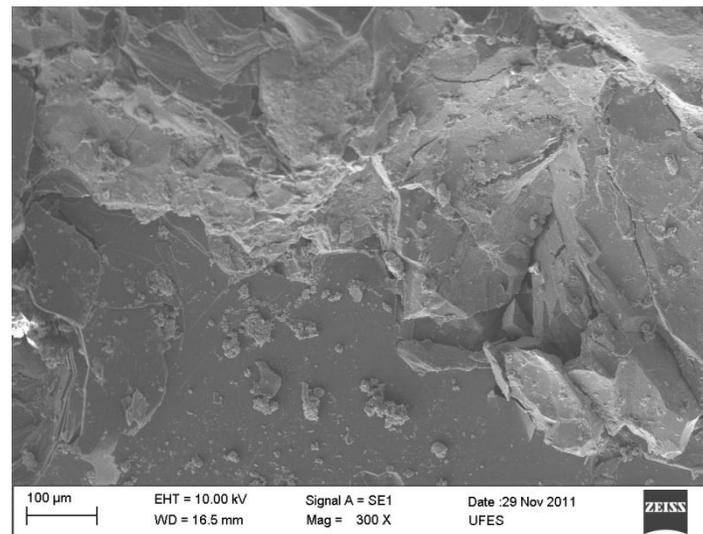


Figura B.7.18 - S 20 – idade 28 dias – ampliação 2000x

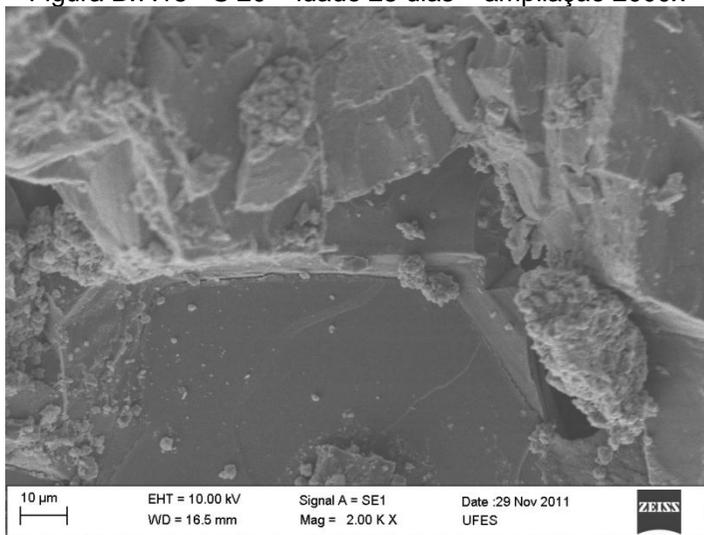


Figura B.7.19 - S 20 – idade 28 dias – ampliação 5000x

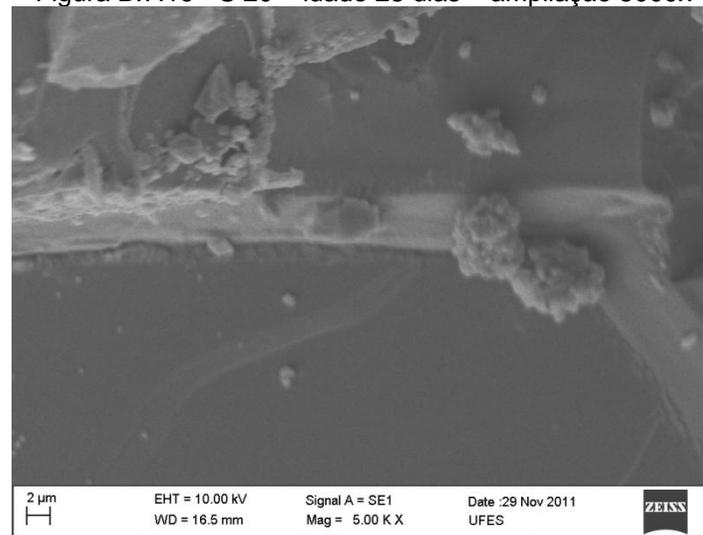


Figura B.7.20 - S 50 – idade 3 dias – ampliação 100x

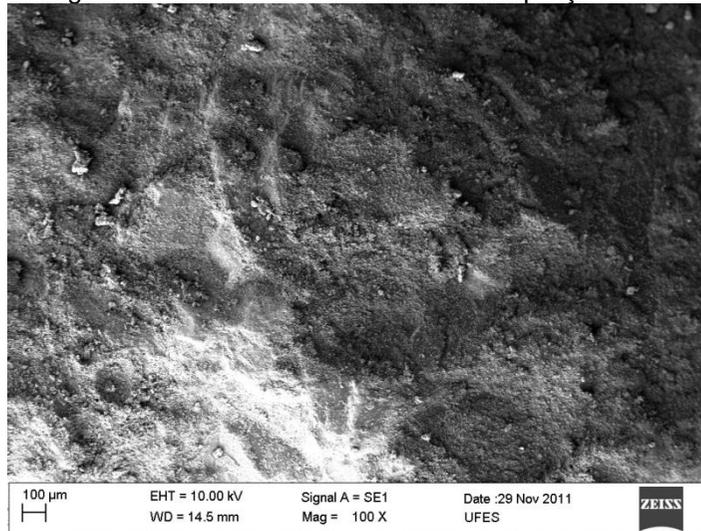


Figura B.7.21 - S 50 – idade 3 dias – ampliação 300x

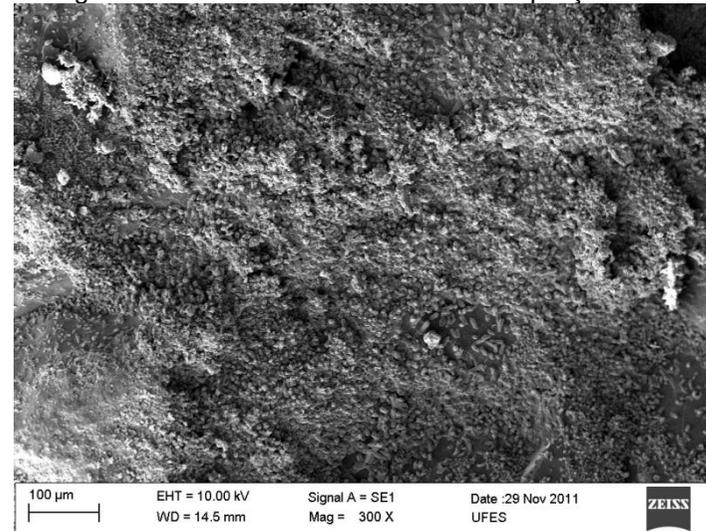


Figura B.7.22 - S 50 – idade 3 dias – ampliação 2000x

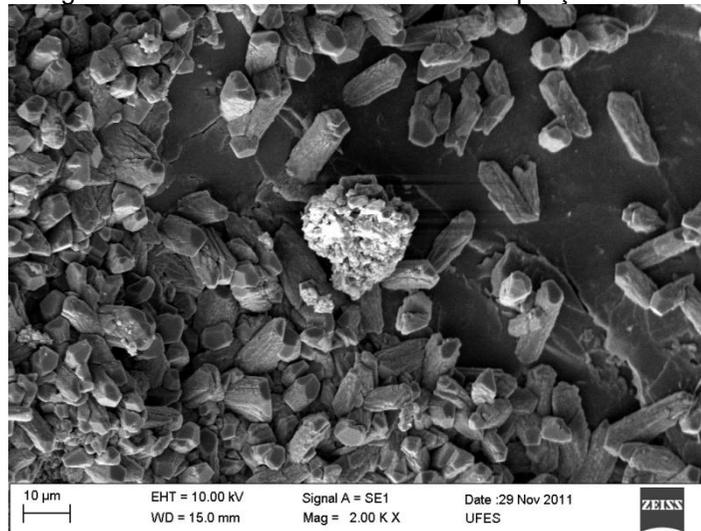


Figura B.7.23 - S 50 – idade 3 dias – ampliação 2000x

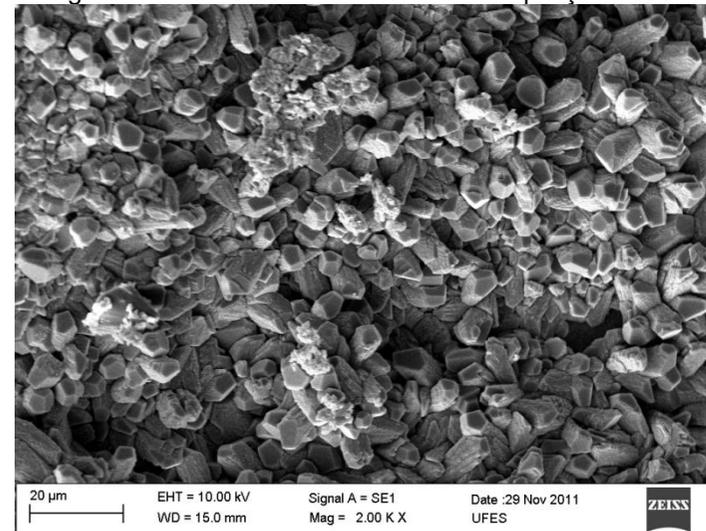


Figura B.7.24 - S 50 – idade 3 dias – ampliação 5000x

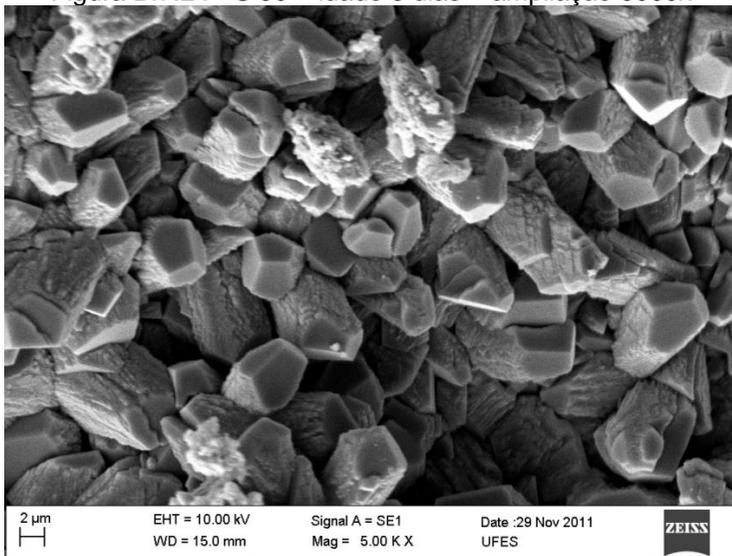


Figura B.7.25 - S 50 – idade 7 dias – ampliação 300x

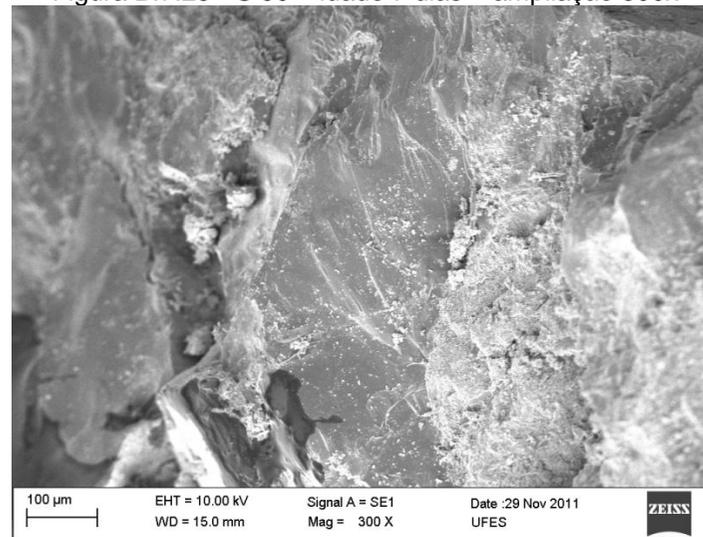


Figura B.7.26 - S 50 – idade 7 dias – ampliação 2000x

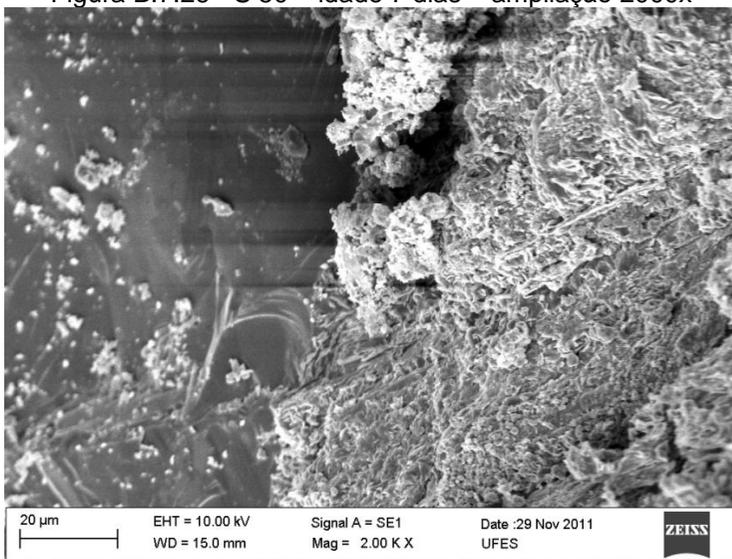


Figura B.7.27 - S 50 – idade 7 dias – ampliação 5000x

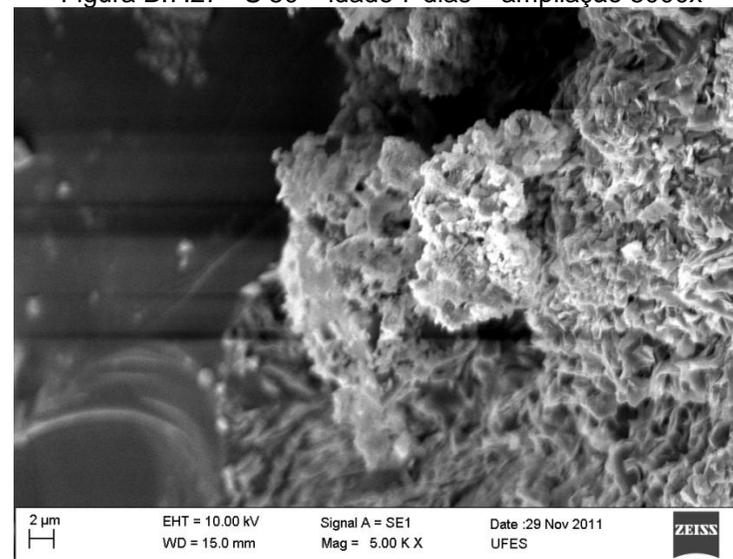


Figura B.7.28 - S 50 – idade 28 dias – ampliação 100x

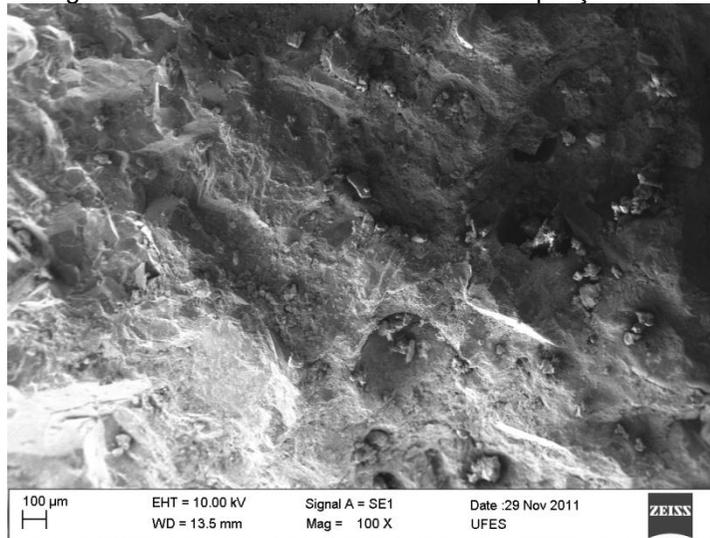


Figura B.7.29 - S 50 – idade 28 dias – ampliação 300x

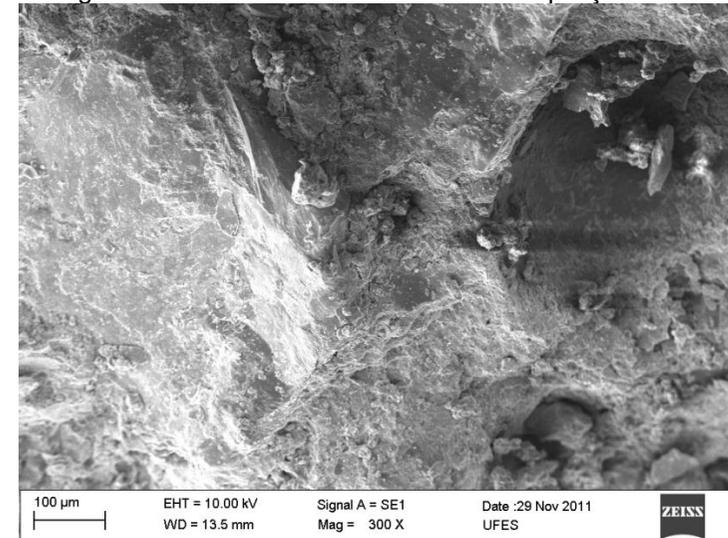


Figura B.7.30 - S 50 – idade 28 dias – ampliação 2000x

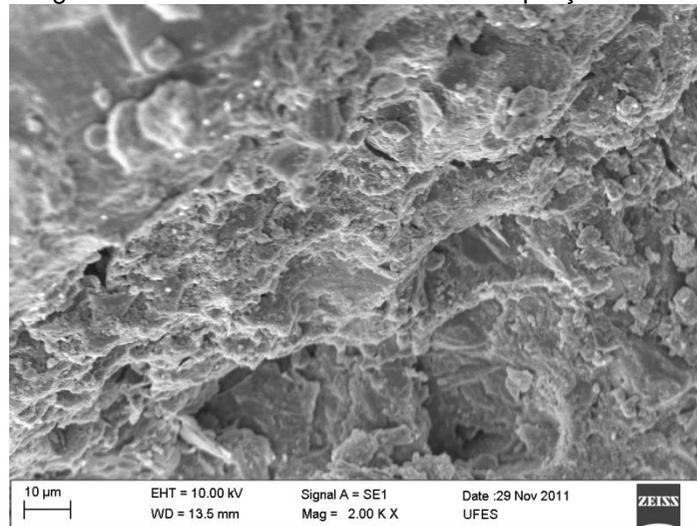


Figura B.7.31 - S 50 – idade 28 dias – ampliação 5000x

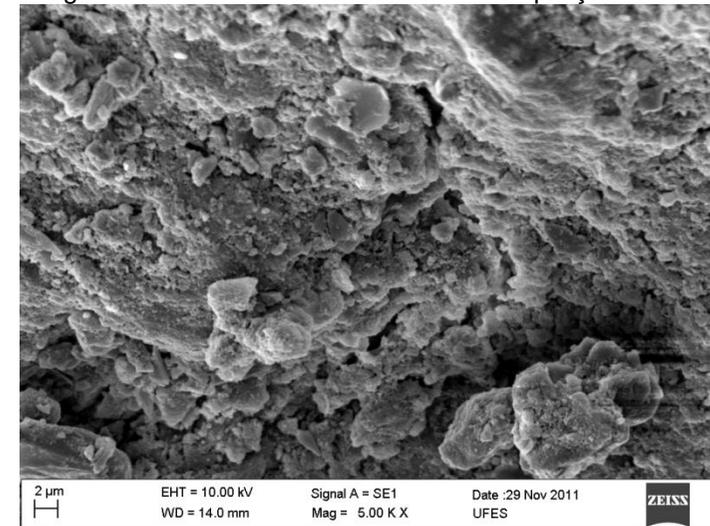


Figura B.7.32 - S 100 – idade 3 dias – ampliação 100x

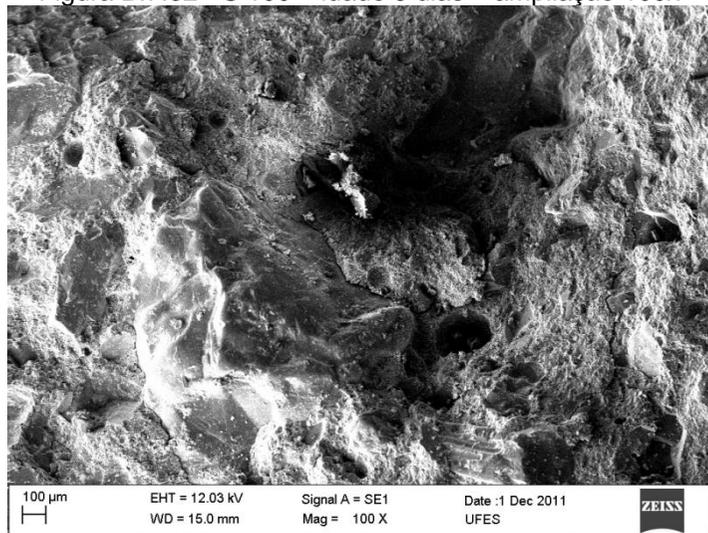


Figura B.7.33 - S 100 – idade 3 dias – ampliação 300x

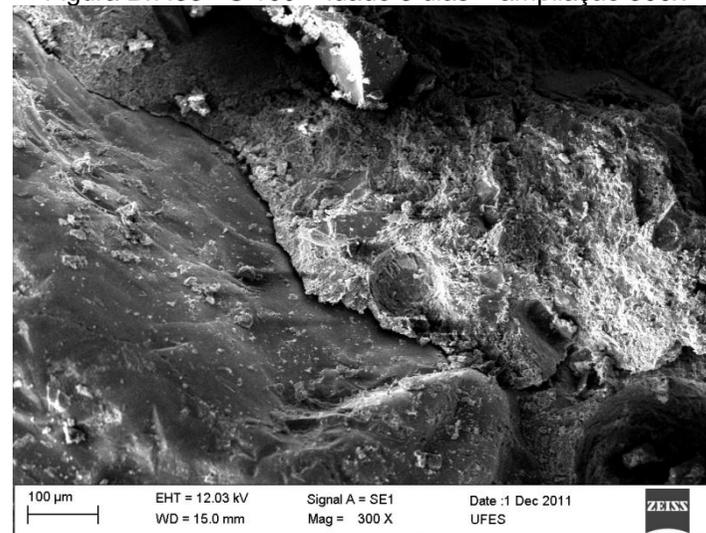


Figura B.7.34 - S 100 – idade 3 dias – ampliação 2000x

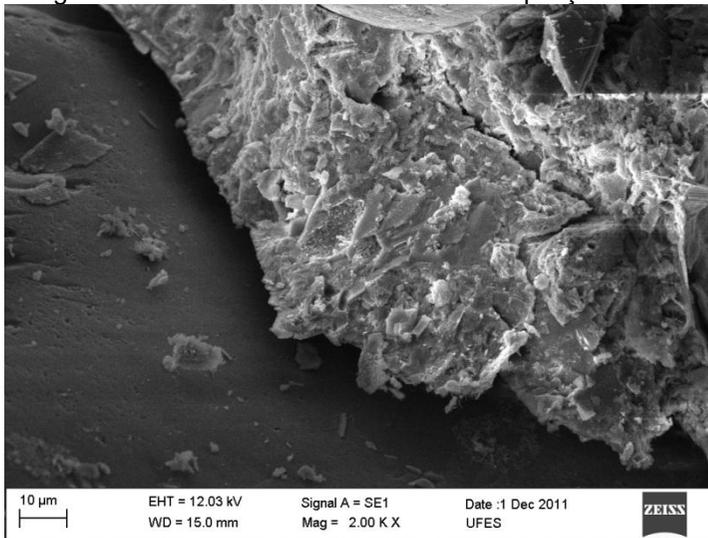


Figura B.7.35 - S 100 – idade 3 dias – ampliação 5000x

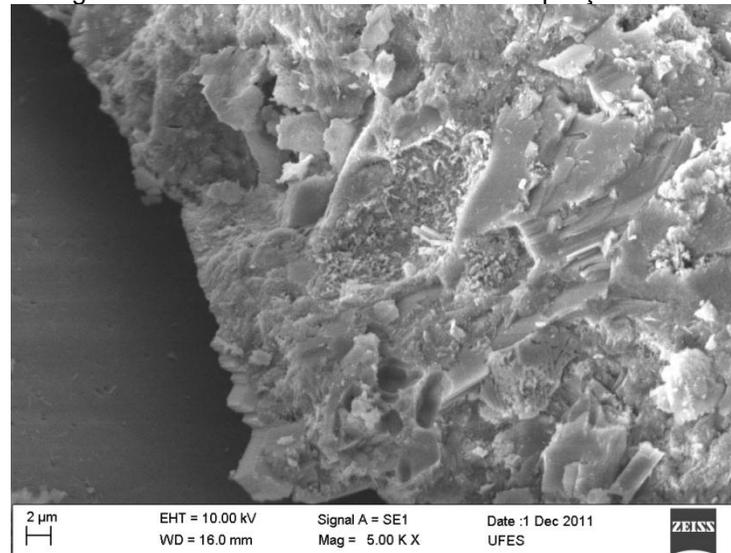


Figura B.7.36 - S 100 – idade 3 dias – ampliação 10000x

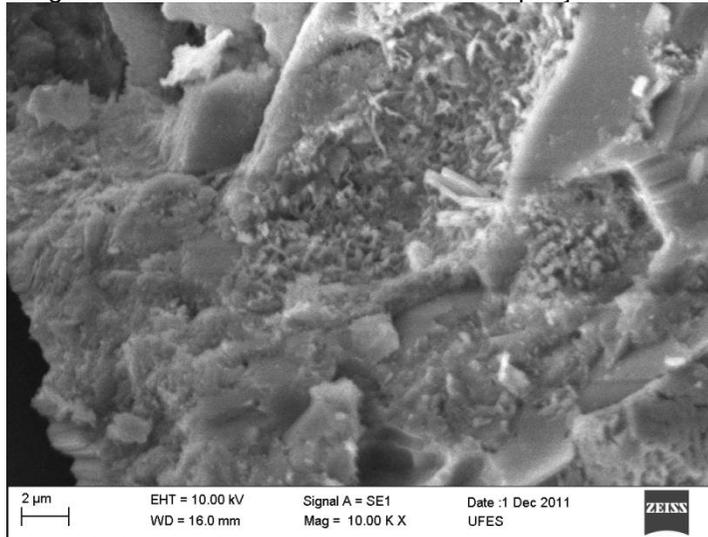


Figura B.7.37 - S 100 – idade 7 dias – ampliação 100x

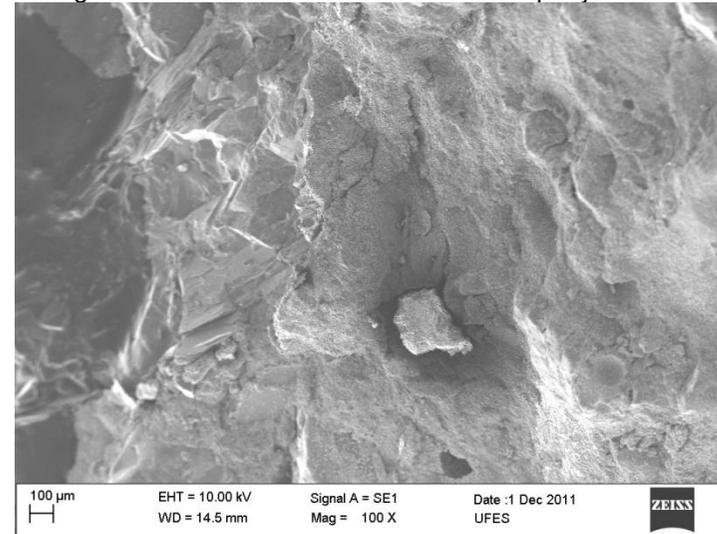


Figura B.7.38 - S 100 – idade 3 dias – ampliação 300x

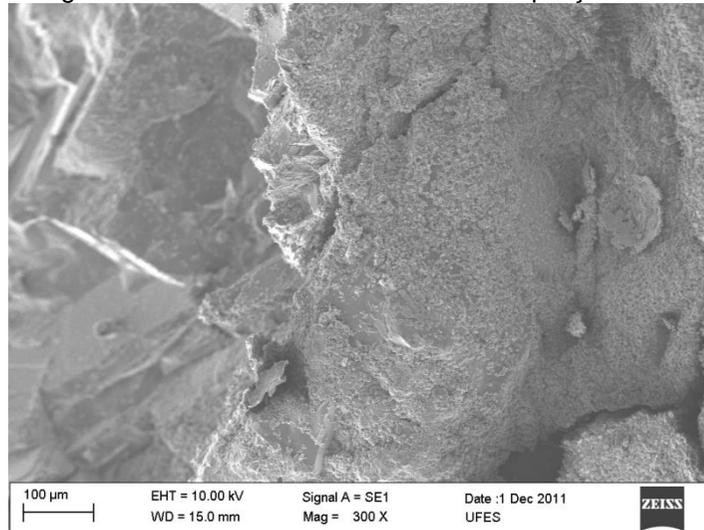


Figura B.7.39 - S 100 – idade 7 dias – ampliação 2000x

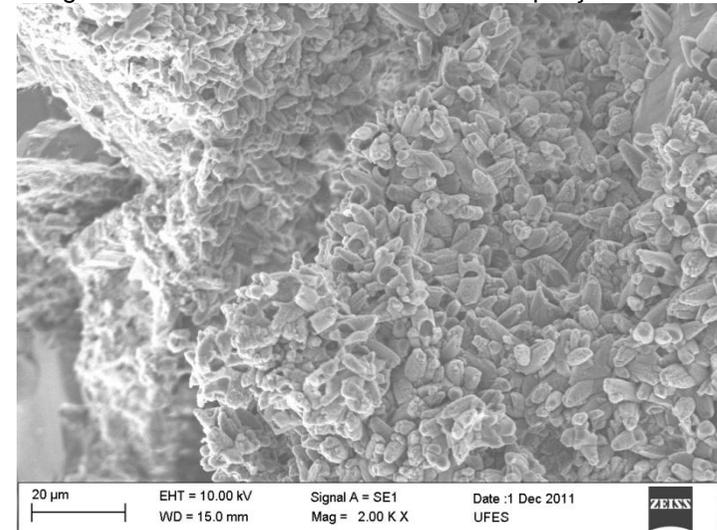


Figura B.7.40 - S 100 – idade 7 dias – ampliação 5000x

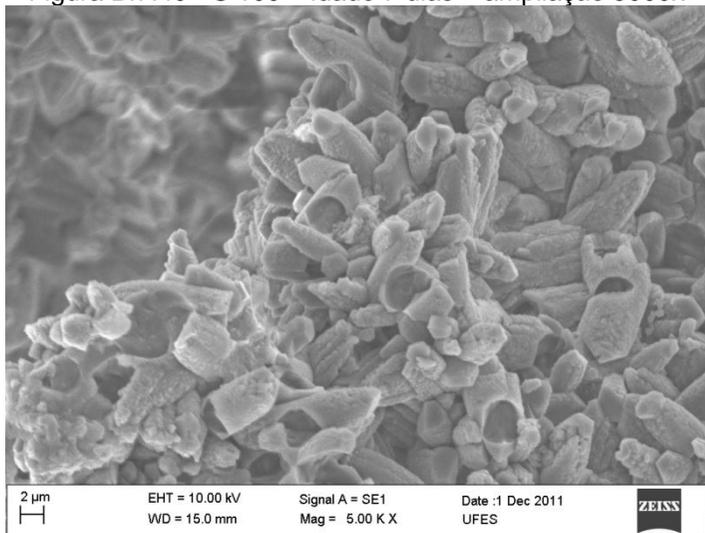


Figura B.7.41 - S 100 – idade 28 dias – ampliação 100x

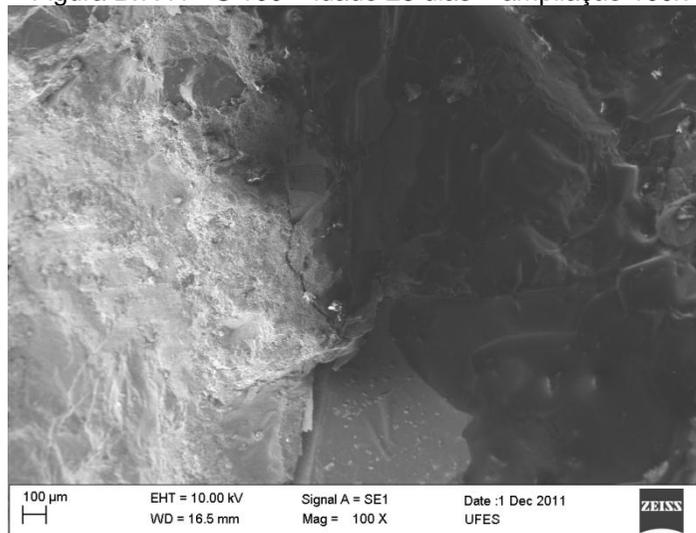


Figura B.7.42 - S 100 – idade 28 dias – ampliação 300x

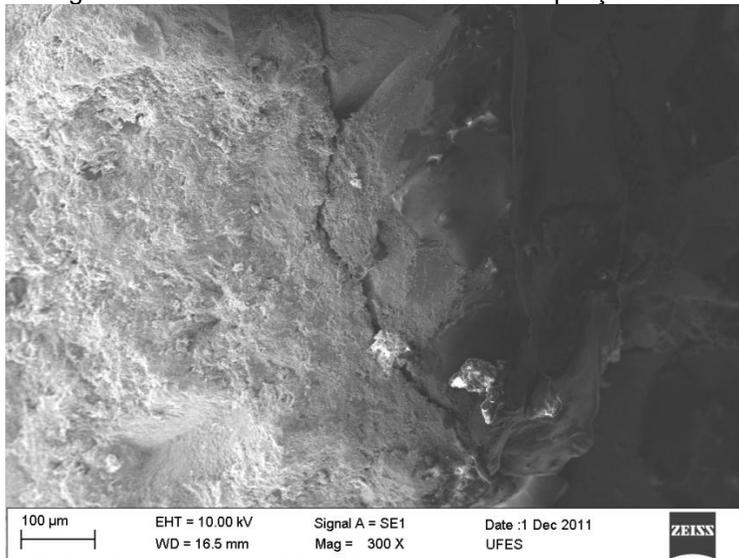


Figura B.7.43 - S 100 – idade 28 dias – ampliação 2000x

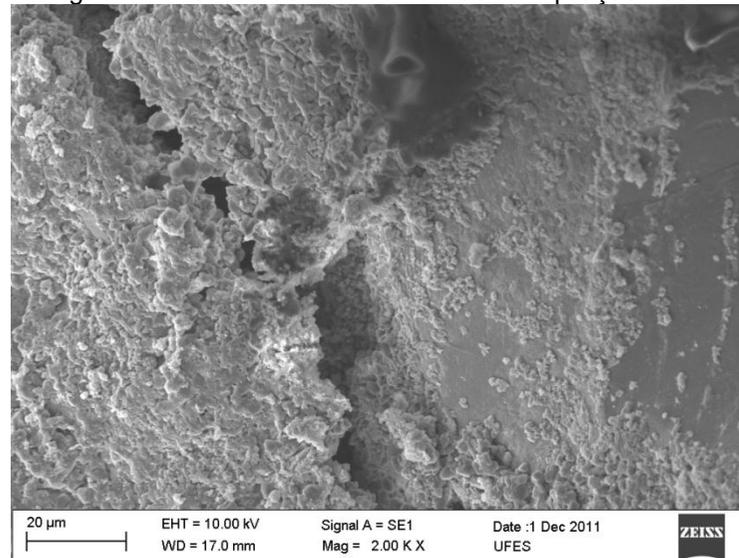
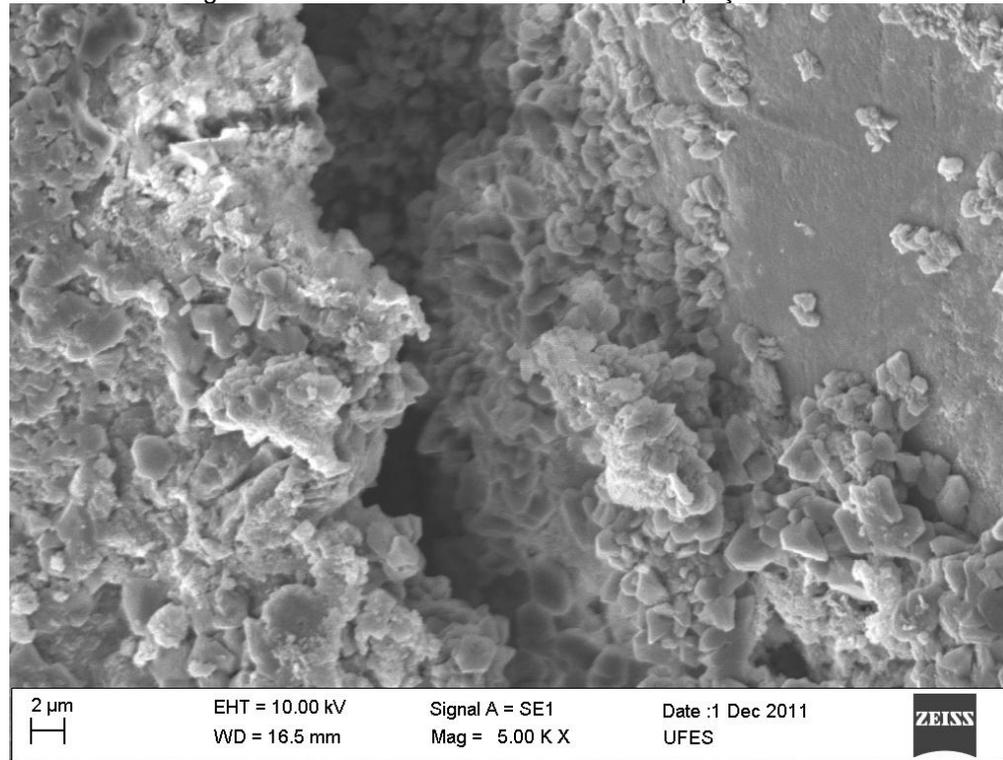


Figura B.7.44 - S 100 – idade 28 dias –ampliação 5000x



B.8 Micrografias e análises químicas por EDS dos concretos com adição do CAP III

Figura B.8.1 - A5 – idade 3 dias – ampliação 100x

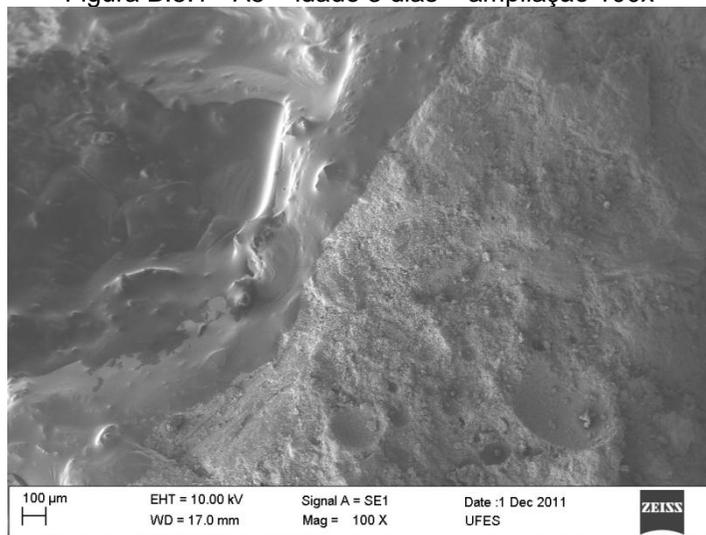


Figura B.8.2 - A5 – idade 3 dias – ampliação 300x

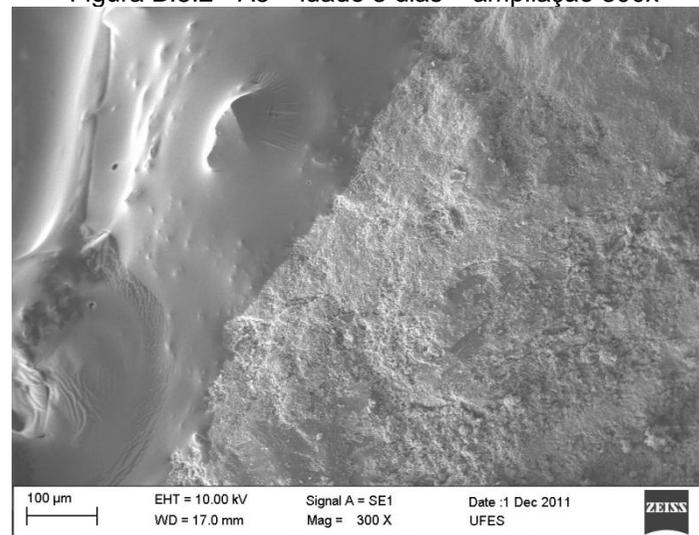


Figura B.8.3 - A5 – idade 3 dias – ampliação 2000x

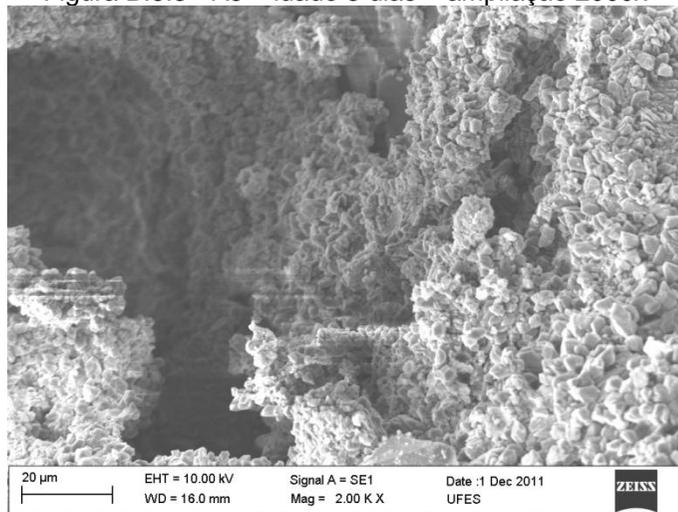


Figura B.8.4 - A5 – idade 3 dias – ampliação 5000x

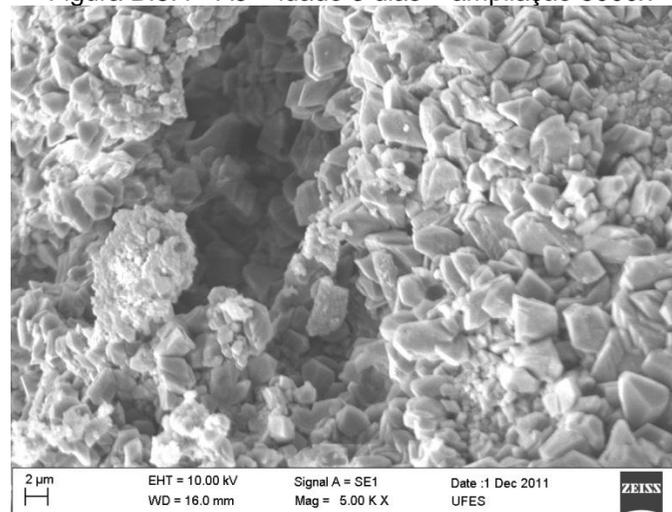


Figura B.8.5 - A5 – idade 7 dias – ampliação 100x

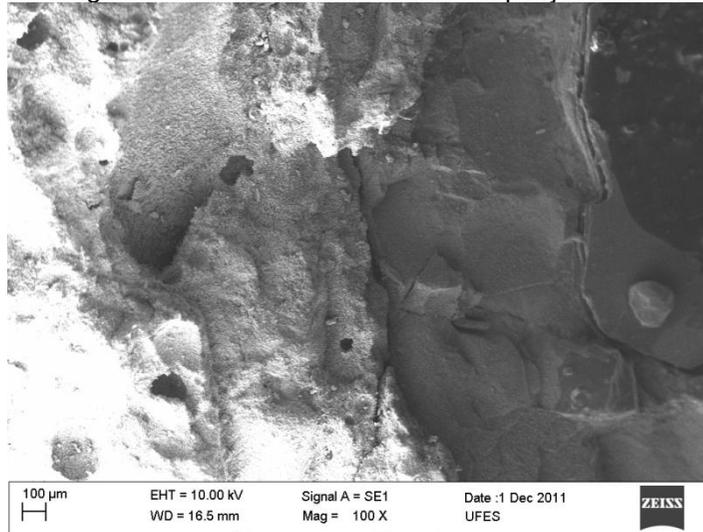


Figura B.8.6 - A5 – idade 7 dias – ampliação 300x

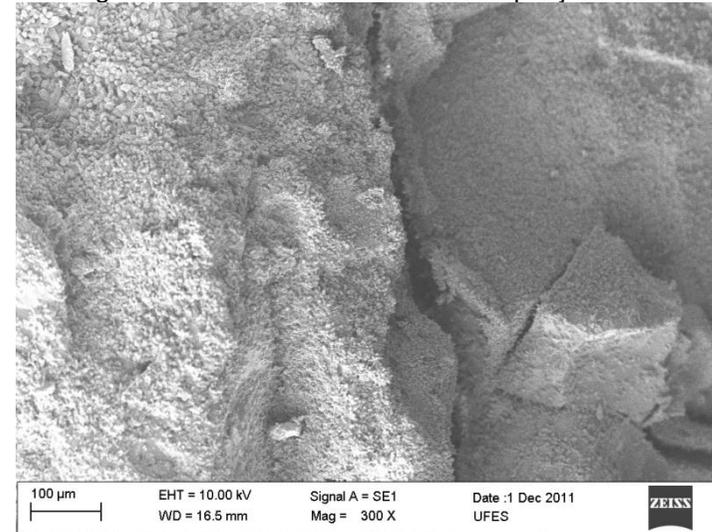


Figura B.8.7 - A5 – idade 7 dias – ampliação 2000x

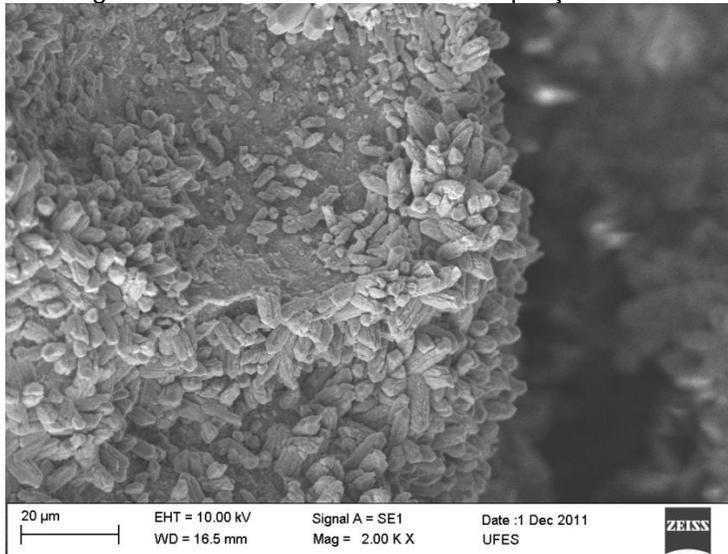


Figura B.8.8 - A5 – idade 7 dias – ampliação 5000x

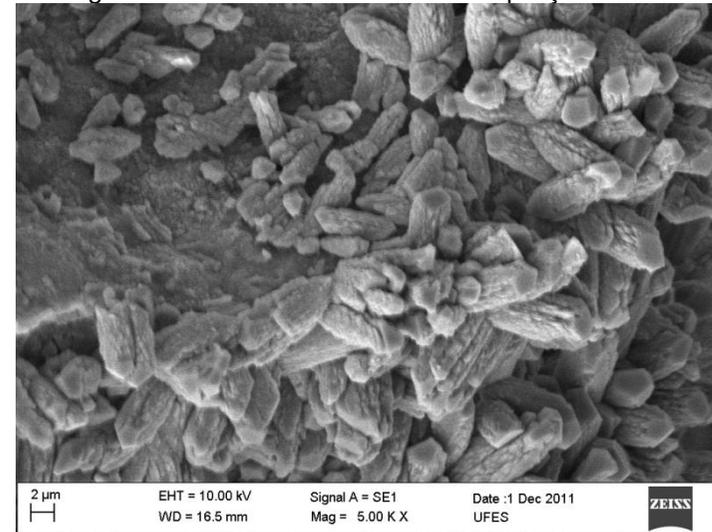


Figura B.8.9 - A5 – idade 28 dias – ampliação 100x

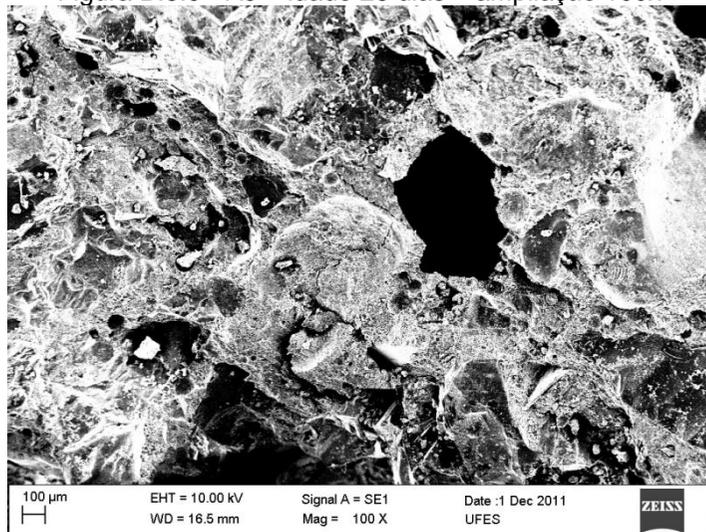


Figura B.8.10- A5 – idade 28 dias – ampliação 300x

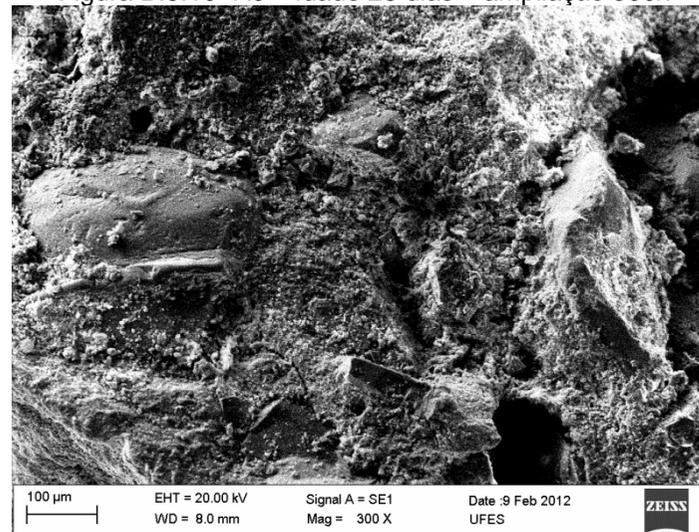


Figura B.8.11 - A5 – idade 28 dias – ampliação 2000x

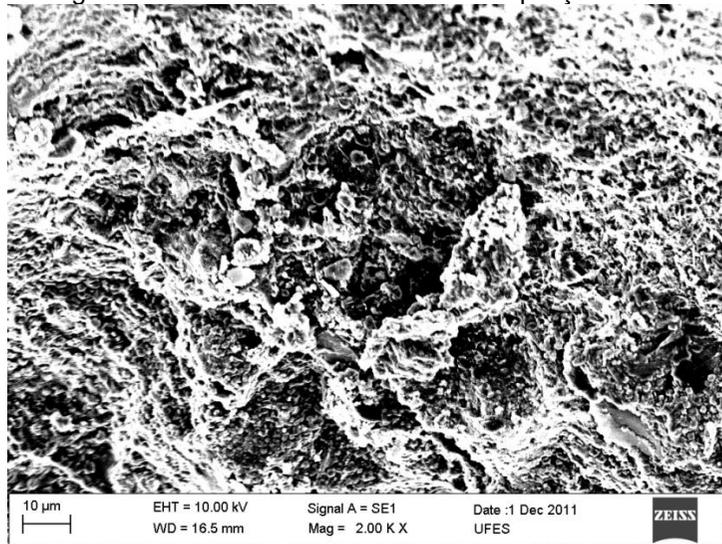


Figura B.8.12 - A5 – idade 28 dias – ampliação 5000x

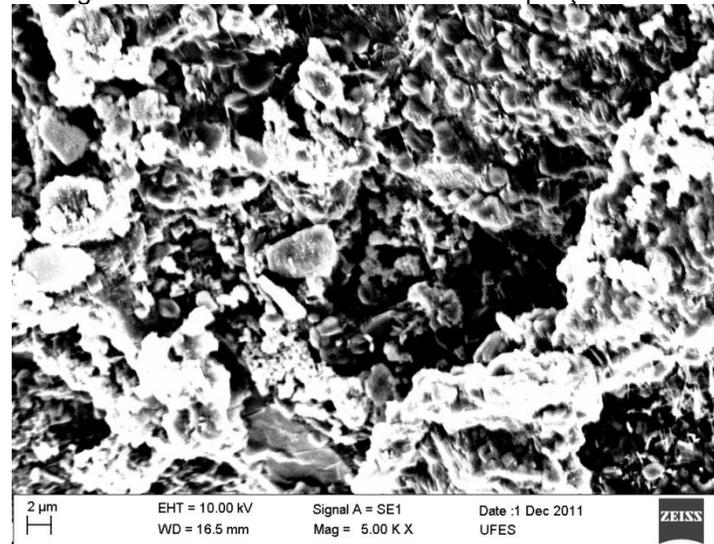


Figura B.8.13- A10 – idade 3 dias – ampliação 100x

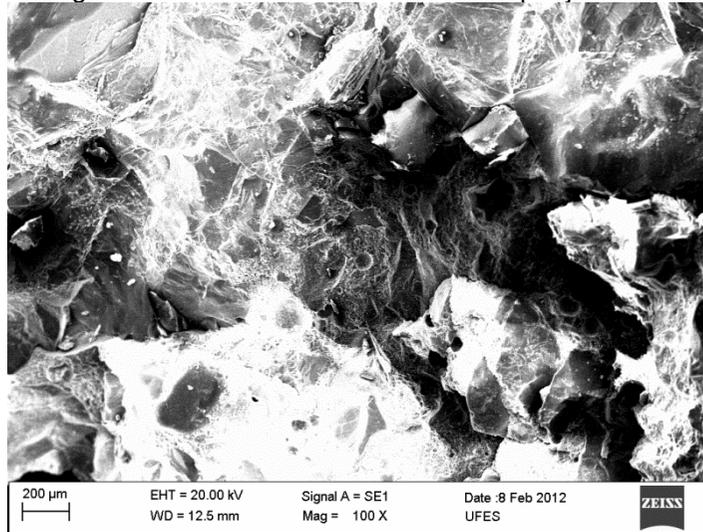


Figura B.8.14 - A10 – idade 3 dias – ampliação 2000x

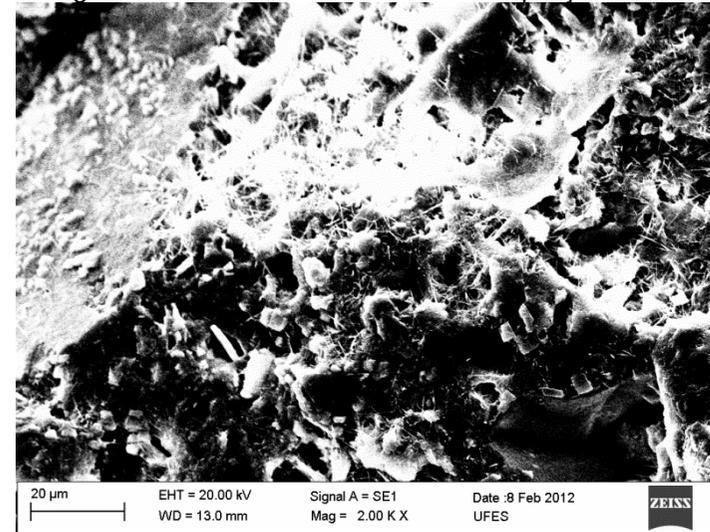


Figura B.8.15 - A10 – idade 3 dias – ampliação 5000x

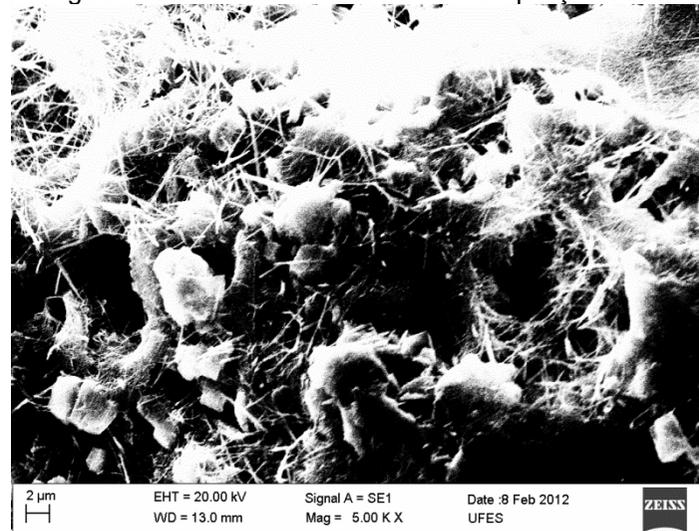


Figura B.8.16 - A10 – idade 7 dias – ampliação 100x

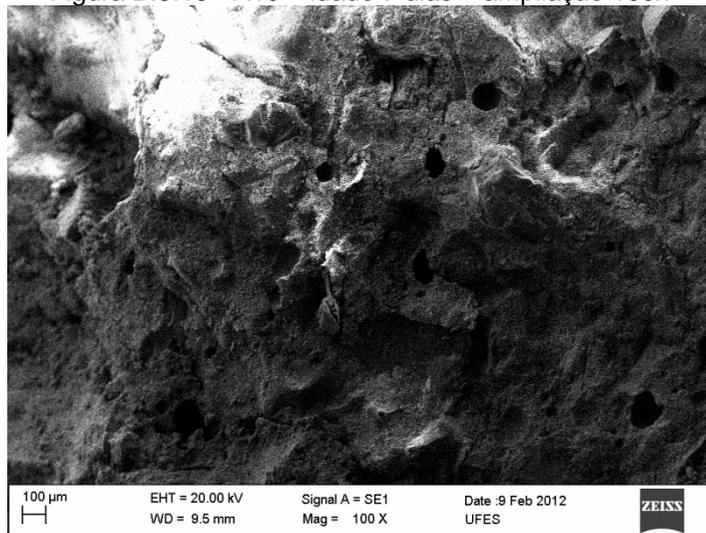


Figura B.8.17 - A10 – idade 7 dias – ampliação 300x

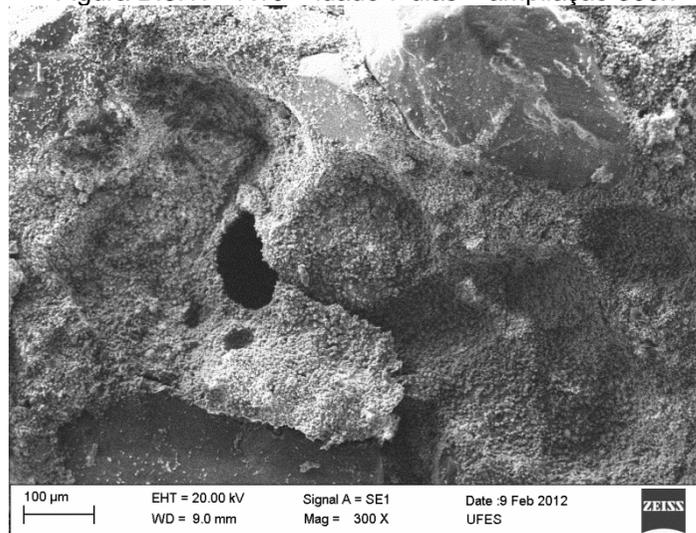


Figura B.8.18 - A10 – idade 7 dias – ampliação 2000x

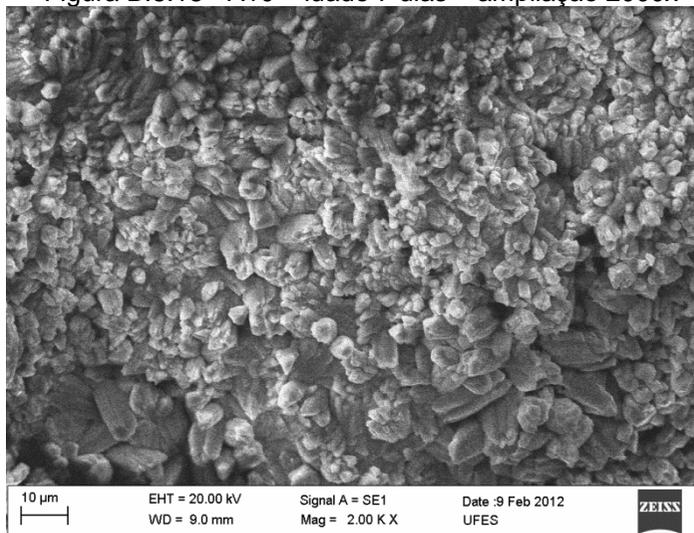


Figura B.8.19 - A10 – idade 28 dias – ampliação 100x

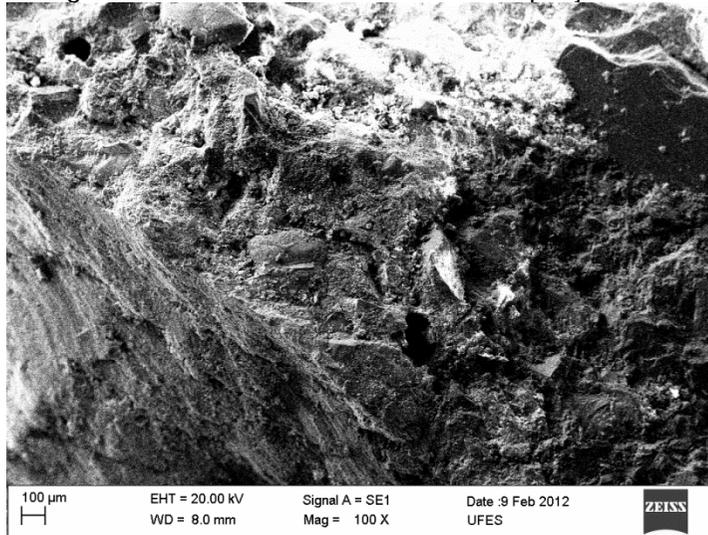


Figura B.8.20 - A10 – idade 28 dias – ampliação 300x

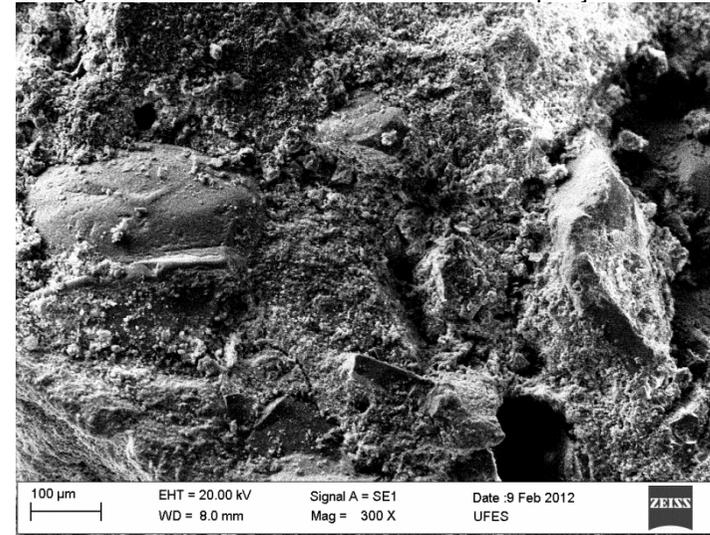


Figura B.8.21 - A10 – idade 28 dias – ampliação 2000x

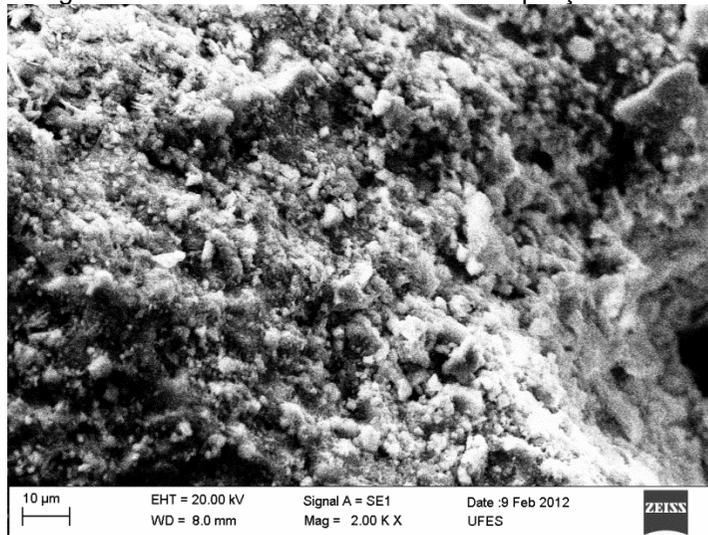


Figura B.8.22 - A10 – idade 28 dias – ampliação 5000x

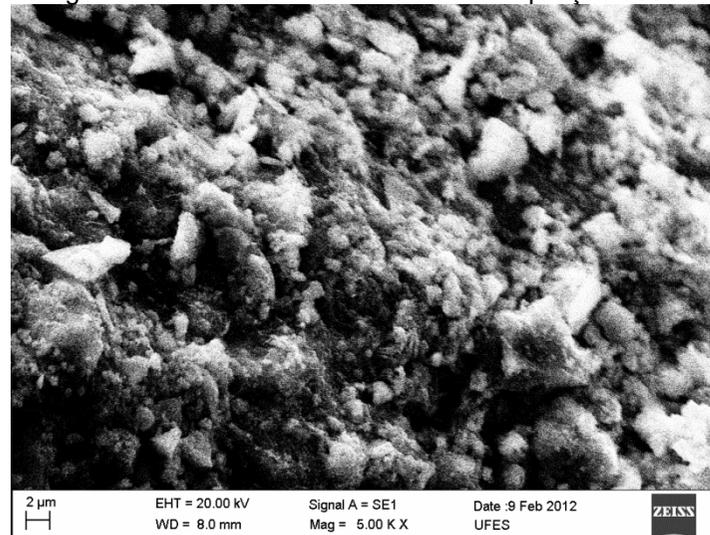


Figura B.8.24 - A15 – idade 3 dias – ampliação 100x

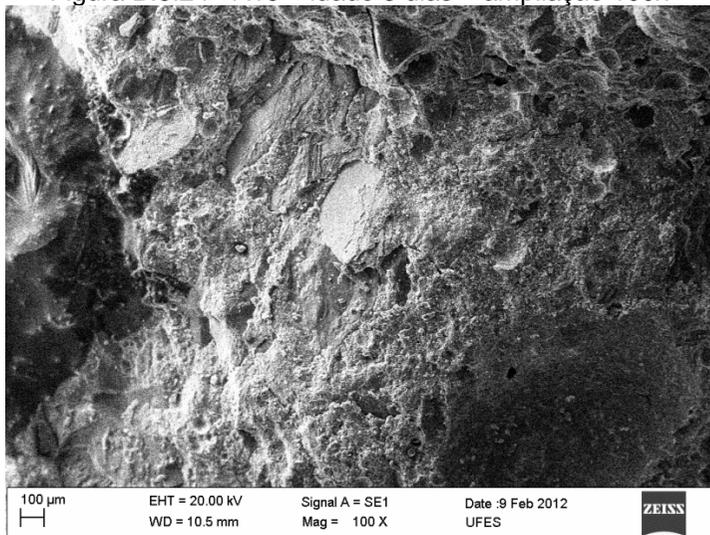


Figura B.8.25 - A15 – idade 3 dias – ampliação 300x

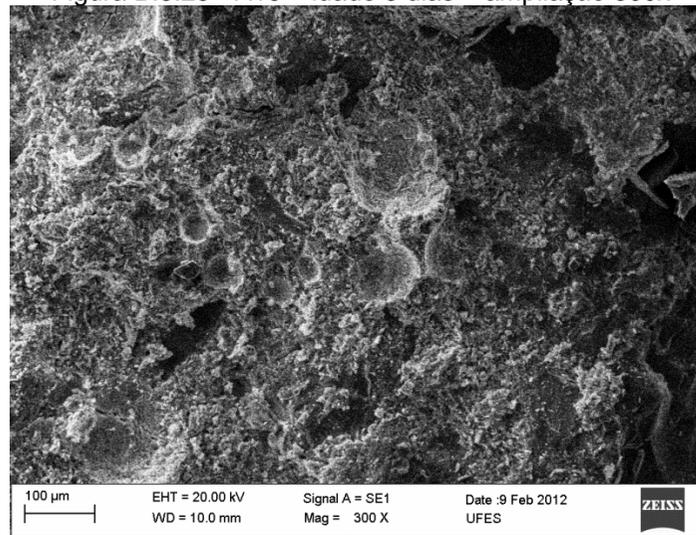


Figura B.8.26 - A15 – idade 3 dias – ampliação 2000x

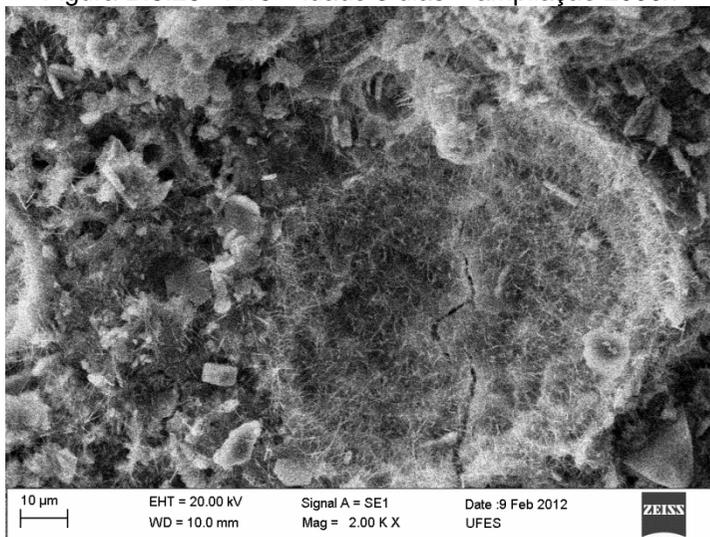


Figura B.8.27 - A15 – idade 3 dias – ampliação 5000x

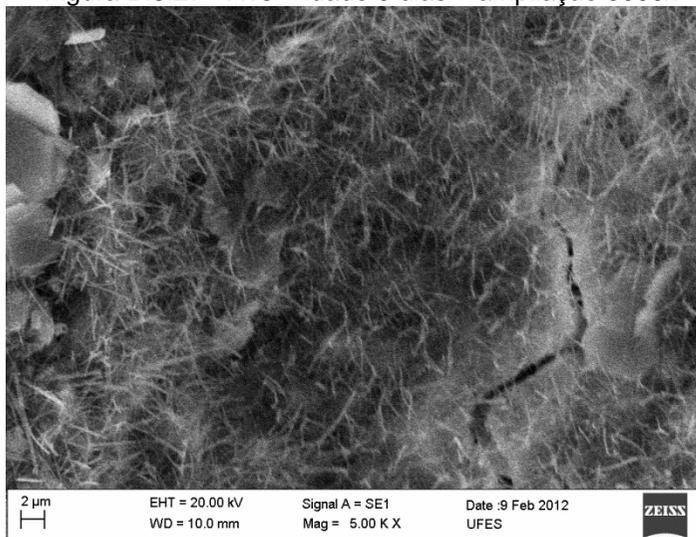


Figura B.8.28 - A15 – idade 7 dias – ampliação 100x

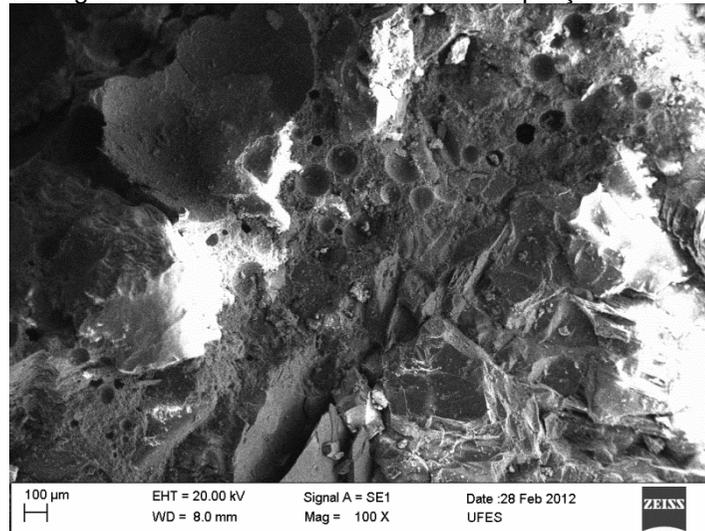


Figura B.8.29 - A15 – idade 7 dias – ampliação 300x

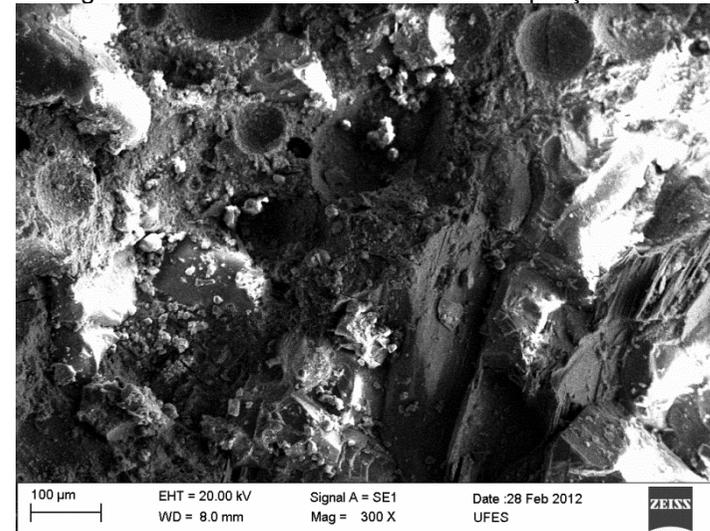


Figura B.8.30 - A15 – idade 7 dias – ampliação 2000x

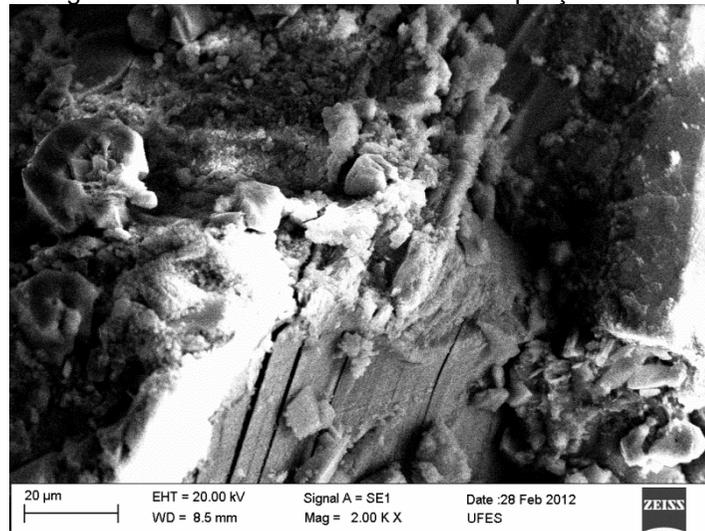


Figura B.8.31 - A15 – idade 7 dias – ampliação 5000x

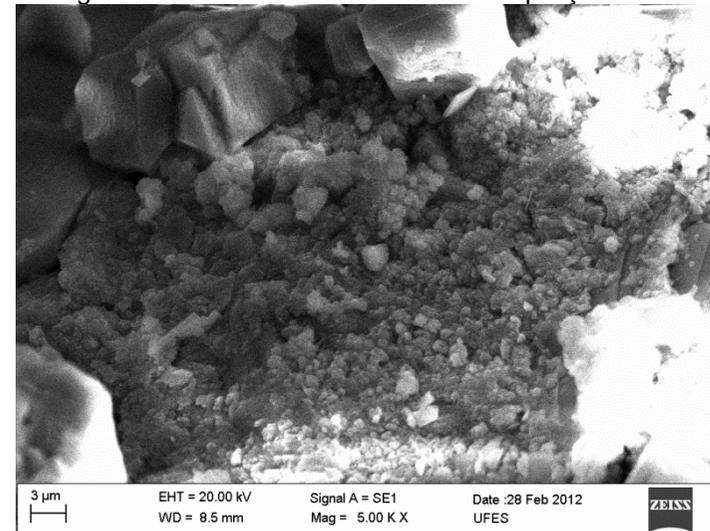


Figura B.8.32 - A15 – idade 28 dias – ampliação 100x

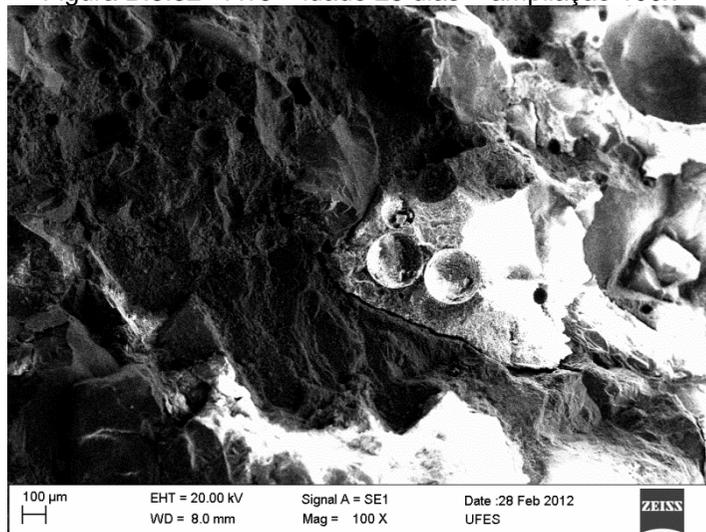


Figura B.8.33 - A15 – idade 28 dias – ampliação 300x

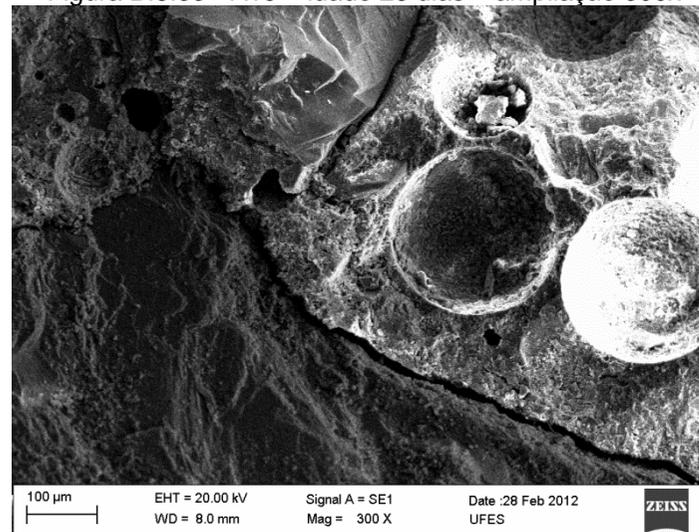


Figura B.8.34 - A15 – idade 28 dias – ampliação 2000x

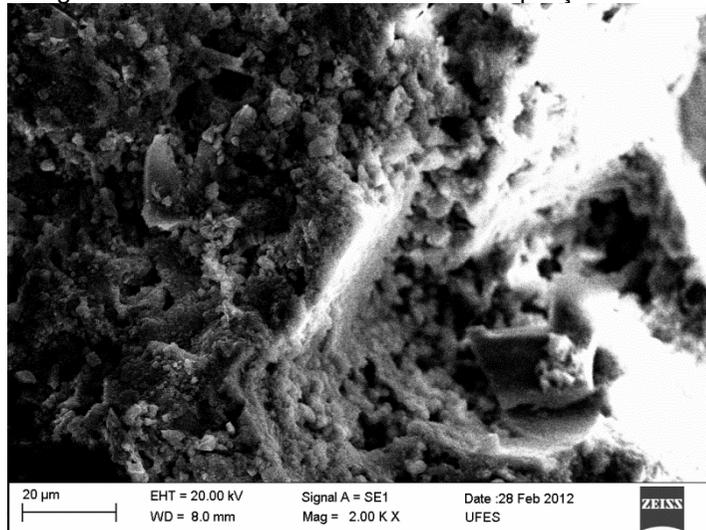
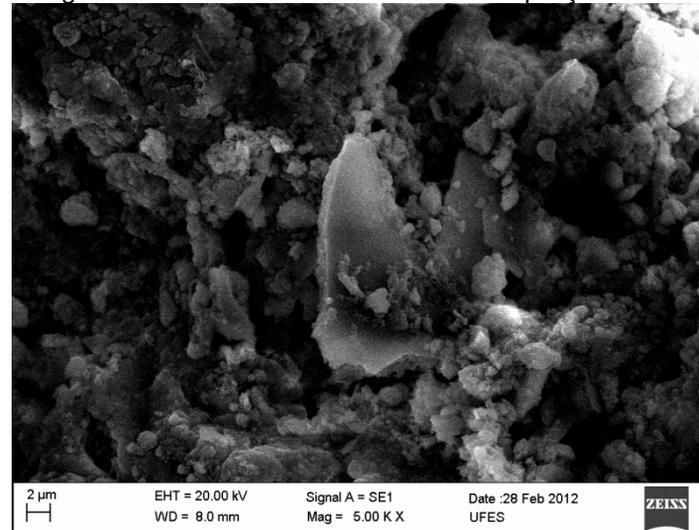


Figura B.8.35 - A15 – idade 28 dias – ampliação 5000x



B.9 - Difractogramas de raios X dos Concretos: Referência, com CAP I e CAP III

Figura B.9.1 – Difractograma do Concreto Referência – CR

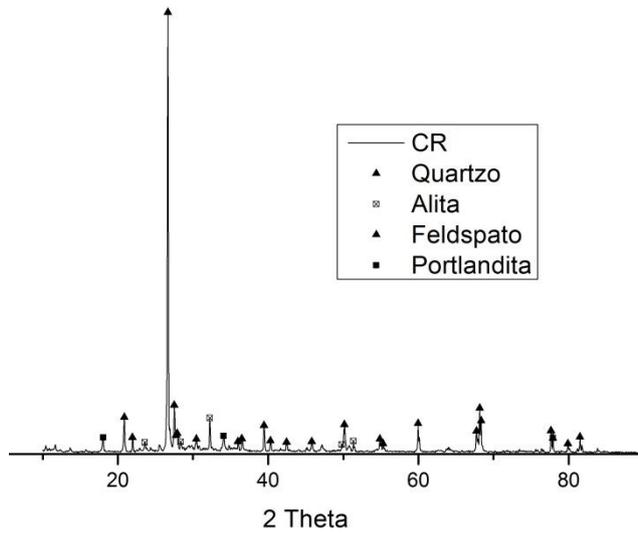


Figura B.9.1 – Difractograma do Concreto S20

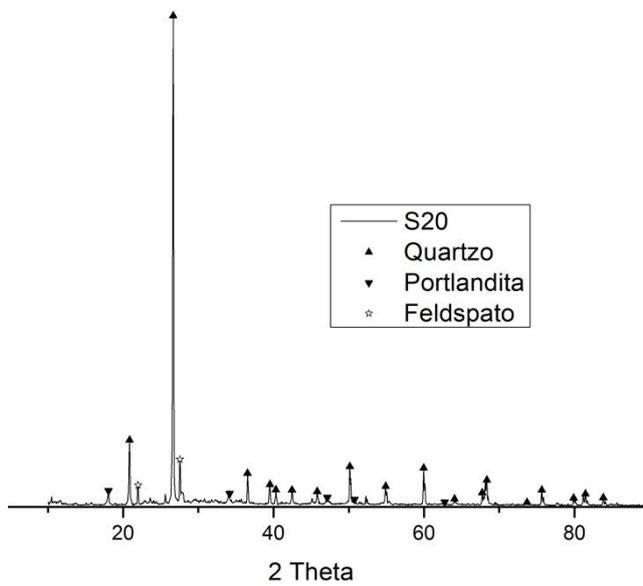


Figura B.9.3– Difratoograma do Concreto S50

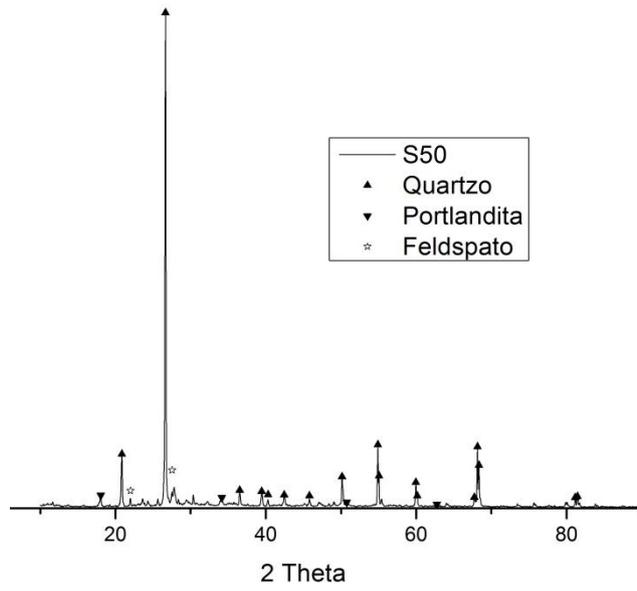


Figura B.9.4 – Difratoograma do Concreto A5

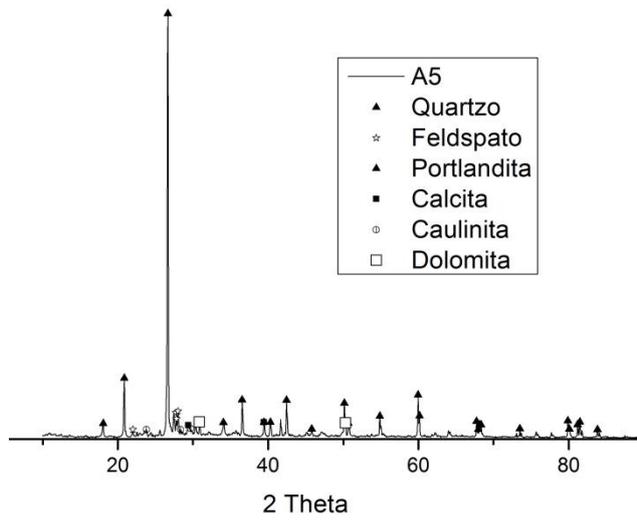


Figura B.9.5 – Difratoograma do Concreto A10

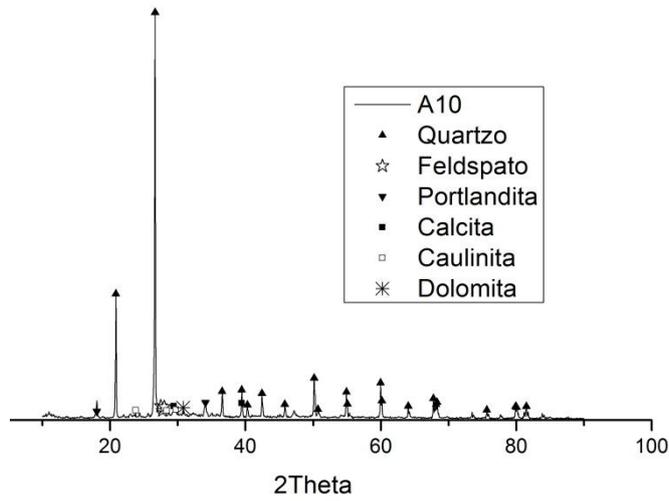
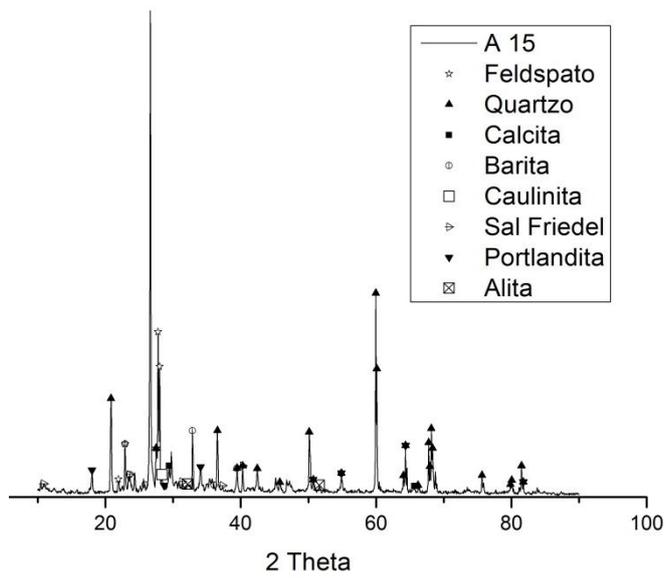


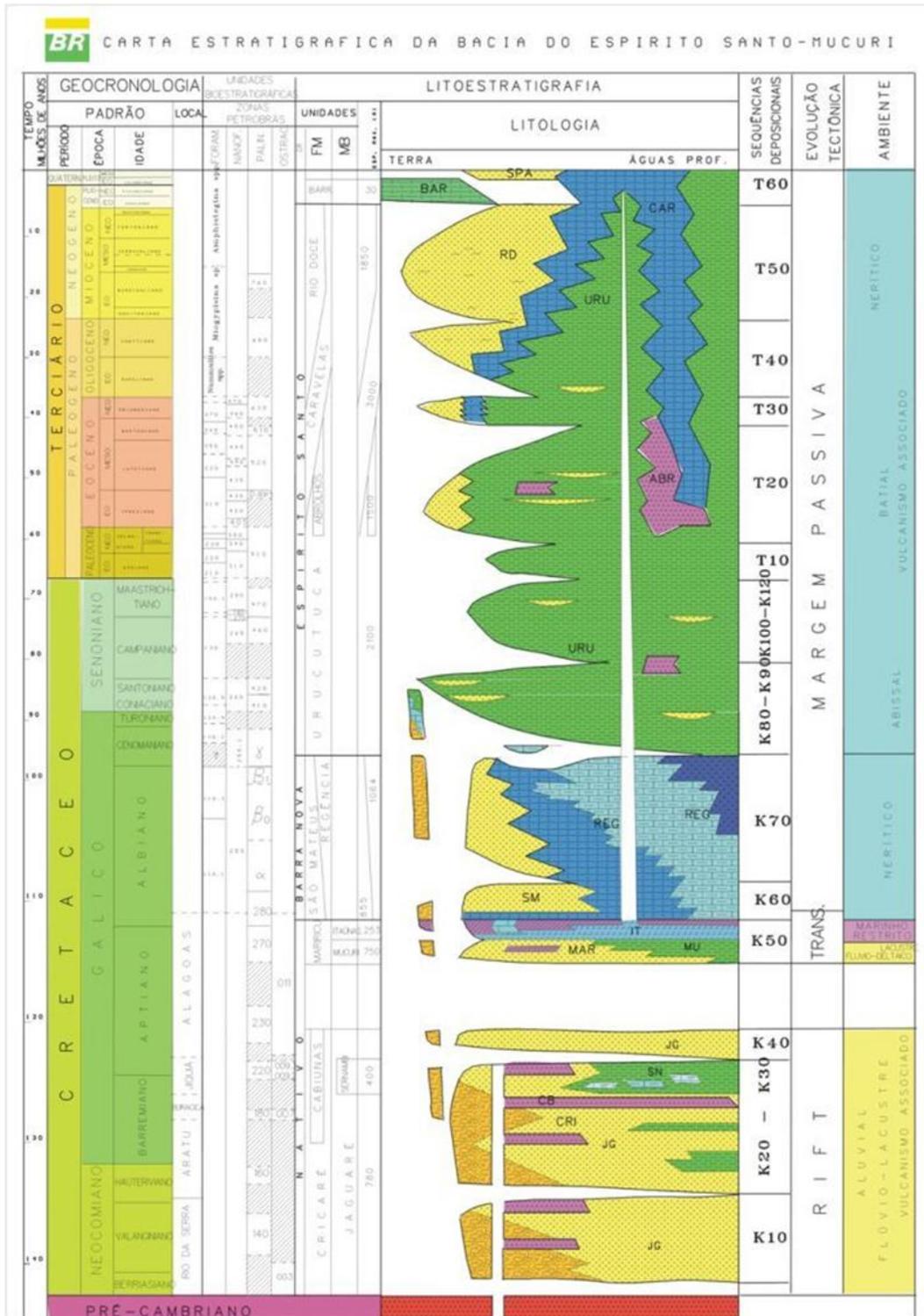
Figura B.9.6 – Difratoograma do Concreto A15



ANEXOS

Anexo A - Carta estratigráfica da Bacia do Espírito Santo-Mucuri

Figura - Anexo A.1 – Carta estratigráfica da Bacia do Espírito Santo-Mucuri



Fonte: Modificada de Vieira et al. (1994).

Anexo B – Relatórios das Análises Ambientais