UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Tese de Doutorado

CONCRETO COM REJEITO DE *SINTER FEED*: ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Autor: Ayrton Vianna Costa

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte
2016

Ayrton Vianna Costa

CONCRETO COM REJEITO DE *SINTER FEED*: ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como exigência parcial à obtenção do grau de Doutor.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

A Deus,
à minha Mãe, à Marise, minha esposa, e aos meus filhos.

AGRADECIMENTOS

Poder agradecer o bem recebido é um ato extremamente gratificante em todos os sentidos.

A quem se agradece, na realidade presta-se uma deferência; é uma homenagem ao seu espírito colaborador, ao seu interesse e desprendimento em ter-se doado, seja em ação, material ou conhecimento.

O agradecido, por sua vez, manifesta de forma ampla, sincera e transparente o seu reconhecimento, satisfação e conforto pelo atendimento e auxílio recebidos.

É um momento, enfim, em que as pessoas se irmanam e crescem pelo prazer da solidariedade.

Em mais este momento marcante de minha vida tenho muitos agradecimentos a fazer, mas gostaria de destacar, entre outros:

Ao Prof. Abdias, que me estimulou, indicou as portas do DEMIN e muito colaborou para que eu trilhasse este caminho.

Ao Prof. Paulo Brandão, meu dedicado orientador, que sempre acreditou em minha disposição para esta caminhada, incentivando e indicando-me os caminhos mais adequados.

Ao Prof. Herman Mansur, Coordenador do PPGEM, por toda a colaboração e estímulo neste desafio.

Ao Prof. Antônio Júnior, pelas suas referências elogiosas e constante incentivador nesta caminhada.

À Profª. Bernadete Trifílio que, em seu silêncio e ausência entre nós, foi incentivo e motivação indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega engº Cláudio, do Laboratório de Tratamento de Rochas/DEMIN, e à sua equipe, pela boa vontade e apoio no preparo de amostras e ensaios.

Ao técnico Breno, do Centro de Microscopia da UFMG, pela sua disposição e dedicação nas jornadas de trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Concreto/DEMC, Ricardo e Dedé, pela inestimável colaboração, interesse e bom humor.

Às colegas e colaboradoras Izabel e Ilda, tão prestativas e atenciosas em suas atividades de laboratório.

À secretaria do PPGEM, por seus funcionários Cida e Nelson, pela sua constante atenção em meu atendimento.

Aos demais colegas e colaboradores aqui não citados, mas dos quais, creiam, não me esqueci.

E por fim, à Escola de Engenharia da UFMG, por meio de seus Departamentos de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, de Engenharia de Minas e de Engenharia de Materiais e Construção, pelo Curso de Doutorado que me proporcionaram e as demais atividades correlatas na produção deste trabalho.

“O homem envelhece quando perde o interesse pelo conhecimento”.

Peter Ferdinand Drucker

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS		x
LISTA DE TABELAS		xviii
LISTA DE SÍGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS		xxi
LISTA DE UNIDADES		xxiii
RESUMO		xxiv
ABSTRACT		xxvi
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	JUSTIFICATIVA	4
4.	HISTÓRICO - ESTADO DA ARTE	5
5.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
5.1.	Microestrutura da fase agregado	16
5.1.1.	Porosidade – massa específica e massa unitária	18
5.1.2.	Porosidade – absorção e umidade superficial	19
5.1.3.	Porosidade – resistência à compressão, resistência à abrasão e módulo de elasticidade	20
5.1.4.	Porosidade – sanidade	20
5.1.5.	Exposição e fabricação – dimensão máxima e composição granulométrica	21
5.1.6	Exposição e fabricação – forma e textura superficial	24
5.1.7	Composição mineralógica – resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias	26
5.2.	Microestrutura da pasta de cimento hidratada	28
5.3.	Interações da pasta de cimento hidratada	38
6.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
6.1.	Infraestrutura e recursos utilizados	48
6.2	Fases da pesquisa	49
6.3.	Caracterização dos materiais - primeiras análises	50
6.3.1	Amostragem	50
6.3.2.	Análise química do rejeito – Laboratório Itaminas	50
6.3.3.	Análise granulométrica do rejeito – ABNT NBR-7211	52
6.3.4	Análise granulométrica da areia	55
6.3.5	Análise granulométrica da brita 0	56
6.3.6	Análise granulométrica da brita 1	57
6.3.7.	Ensaios de solubilização e lixiviação do rejeito – ABNT NBR-10006 e 10005	58
6.3.8.	Análise da reatividade potencial álcali-agregado do rejeito	61
6.3.9.	Análise de durabilidade (sanidade) do rejeito	63
6.3.10.	Difratometria de raios-X do rejeito e da areia normal do IPT	64
6.3.11.	Área superficial específica (adsorção gasosa) e porosimetria (condensação gasosa) do rejeito e da areia normal do IPT	69

6.3.12. Microscopia de varredura de feixe de elétrons (MEV) e espectrometria por dispersão de energia (EDS) do rejeito 77
6.3.13. Informações sobre os cimentos utilizados 85

7. RESULTADOS E COMENTÁRIOS - ENSAIOS COMPARATIVOS 87
7.1. Ensaios comparativos com as argamassas 87
7.1.1. Ensaios comparativos de resistência à compressão simples das argamassas 92
7.1.2. Ensaios comparativos de consistência das argamassas 92
7.1.3. Estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons nas amostras dos corpos de prova do 2º lote das argamassas 94
7.1.3.1. Argamassa com a areia normal do IPT 97
7.1.3.2. Argamassa com rejeito de *sinter feed* 100
7.2. Ensaios comparativos com os concretos 103
7.2.1. Estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons das zonas de transição – Interface pasta/agregado – concretos com fator a/c = 0,63 110
7.2.2. Estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons das zonas de transição – Interface pasta/agregado – concretos com fator a/c = 0,52 135
7.2.3. Ensaios comparativos das resistências à compressão simples 149
7.2.4. Ensaios comparativos das resistências à tração por compressão diametral 154
7.2.5. Ensaios comparativos dos módulos de elasticidade dinâmicos 158
7.2.6. Ensaios comparativos das resistências à abrasão seca 160
7.2.7. Ensaios comparativos das resistências à abrasão hídrica 165
7.2.8. Ensaios comparativos das absorções por capilaridade 174
7.2.9. Ensaios comparativos adicionais de durabilidade acelerada 178

8. ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO 182
8.1.1. Resistência à compressão simples 182
8.1.2. Resistência à tração por compressão diametral 188
8.1.3. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico 194
8.1.4. Resistência à abrasão seca 200
8.1.5. Resistência à abrasão hídrica 206
8.1.6. Avaliação da absorção por capilaridade 212

9. CONCLUSÕES 224

10. RELEVÂNCIA DA PESQUISA 226

11. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS 229

REFERÊNCIAS 231

ANEXOS 235

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 –	Instalação de peneiramento para produção do Pavieco	6
Figura 4.2 –	Vista dos primeiros tipos de Pavieco produzidos	6
Figura 4.3 –	Vista de trecho do bairro Jd. Canadá em Nova Lima pavimentado com bloquetes produzidos com material semelhante ao da presente pesquisa	6
Figura 4.4 –	Vista da área de estoque de bloquetes produzidos com rejeito de minério em Inhotim	7
Figura 4.5 –	Vista de trecho de pavimentação em Inhotim com bloquetes produzidos com rejeito de minério de ferro	7
Figura 4.6 –	Vista da dimensão de uma das pilhas de estoque (rejeito de *sinter feed*)	13
Figura 4.7 –	Aspecto do rejeito de *sinter feed* objeto desta pesquisa	15
Figura 5.8 –	Diagrama da interrelação microestrutura, condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado	17
Figura 5.9 –	(a) Agregado em várias condições de umidade; (b) inchamento devido à umidade no agregado miúdo	19
Figura 5.10 –	Detalhe da seção de um corpo de prova produzido com rejeito de *sinter feed – aparência bifásica*	29
Figura 5.11 –	Vista de uma interface agregado/matriz da argamassa com rejeito: 500x	30
Figura 5.12 –	Visão ampliada da área destacada da imagem anterior: 3000x	30
Figura 5.13 –	(a) Micrografia eletrônica de varredura dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição; (b) Representação diagramática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto	35
Figura 5.14 –	Variações na porosidade capilar com diferentes relações água/cimento e grau de hidratação	40
Figura 5.15 –	Influência da relação água/cimento e do grau de hidratação sobre a resistência e a permeabilidade	41
Figura 5.16 –	(a) Perda de água em função da umidade relativa; (b) retração de uma argamassa em função da perda de água	42
Figura 5.17 –	Curvas de distribuição de pequenos poros em pastas de cimento com diferentes relações água/cimento	43
Figura 6.18 –	Fluxograma das atividades da pesquisa	47
Figura 6.19 –	Ensaio de contraprova em solubilização para o elemento manganês presente no rejeito	60
Figura 6.20 –	Ábaco de plotagem dos resultados da análise de reatividade potencial	62
Figura 6.21 –	Frações pulverizadas do rejeito de *sinter* feed para a difratometria de raios-X	64
Figura 6.22 –	Amostra pulverizada da areia normal do IPT para a difratometria de raios-X	64
Figura 6.23 –	Difratômetro de raios-X da marca Philips Panalytical, mod. PW3710, com geometria θ/2θ	65

Figura 6.24 – da fração do rejeito retida na peneira de malha 4,8mm. Q, H, Gt = abundantes; G = baixo 65
Figura 6.25 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 2,4mm. Q, = abundante; H, Gt =médios; G = baixo 66
Figura 6.26 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 1,2mm. Q = abundante; H, Gt = médios; G = baixo 66
Figura 6.27 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 0,6mm. Q, H= abundantes; Gt =médio; G = baixo 67
Figura 6.28 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 0,3mm. H = abundante; Q, Gt =médios; G = baixo 67
Figura 6.29 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 0,15mm. H = abundante; Gt =médio; Q, G = baixos 68
Figura 6.30 – Difratograma da fração do rejeito coletada na bandeja de fundo. H = abundante; Gt =médio; Q, G = baixos 68
Figura 6.31 – Difratograma da areia normal do IPT 69
Figura 6.32 – Aparelho Quantachrome Nova 1000 70
Figura 6.33 – Amostra do rejeito de *sinter feed*, para as análises de área superficial específica e porosimetria de adsorção/ condensação de nitrogênio 70
Figura 6.34 – Amostra da areia normal do IPT, para as análises de área superficial específica e porosimetria de adsorção/ condensação de nitrogênio 70
Figura 6.35 – Ficha de resultados #2 72
Figura 6.36 – Ficha de resultados #3 73
Figura 6.37 – Ensaio da areia normal do IPT 77
Figura 6.38 – Seção polida de amostra do rejeito de *sinter feed* 78
Figura 6.39 – MEV-FEG da marca Quanta 200 FEI 78
Figura 6.40 – Imagem gerada de elétrons retroespalhados IER áreas #1, 2, 3. Área composta por grãos imbricados de hematita martítica e gibsita, com goethita minoritária; porosidade baixa 79
Figura 6.41 – Espectrograma da área 1; grão de gibsita 79
Figura 6.42 – Espectrograma da área 2; grão de goethita maciça 80
Figura 6.43 – Espectrograma da área 3; grão de hematita martítica 80
Figura 6.44 – Imagem gerada de elétrons retroespalhados IER áreas #4, 5. Área muito porosa, contendo goethita botrioidal e terrosa, com quartzo minoritário 81
Figura 6.45 – Espectrograma da área 4; grão de quartzo 81
Figura 6.46 – Espectrograma da área 5; grão de goethita botrioidal 82
Figura 6.47 – Imagem gerada de elétrons retroespalhados IER áreas 6, 7. Área composta dominantemente por gibsita maciça e hematita martítica 82
Figura 6.48 – Espectrograma da área 6; grão de gibsita 83
Figura 6.49 – Espectrograma da área 7; grão de gibsita contendo algum ferro 83
Figura 6.50 – Aspectos morfológicos do material. IER. a) partícula muito porosa composta de hematita e goethita; b, c, d) detalhe com área microporosa composta por minerais de ferro 84
Figura 6.51 – Curva de Abrams do cimento Holcim CP II – E 32 85
Figura 6.52 – Curva de Abrams do cimento Liz CP IV – 40 RS Super 86

Figura 7.53 – Ilustração da granulometria do rejeito para estabelecimento do percentual das respectivas frações 88
Figura 7.54 – Ilustração das frações da areia normal para montagem de granulometria idêntica à do rejeito 88
Figura 7.55 – Fase da moldagem dos corpos de prova das argamassas 89
Figura 7.56 – Corpos de prova das argamassas moldados e enformados 89
Figura 7.57 – Corpos de prova Ø 5x10 cm do 1º lote de argamassas 90
Figura 7.58 – Corpos de prova Ø 5x10 cm do 2º lote de argamassas 91
Figura 7.59 – Etapa de ensaio do índice de consistência da argamassa com rejeito 94
Figura 7.60 – Amostra serrada de CP moldado de argamassa com areia normal do IPT 94
Figura 7.61 – Amostra serrada de CP moldado de argamassa com o rejeito 94
Figura 7.62 – Serra de corte de disco para preparo de amostras de pequena dimensão 95
Figura 7.63 – Amostra das argamassas prontas para a metalização e ensaio de microscopia eletrônica 95
Figura 7.64 – Imagem da metalizadora das amostras para as análises do MEV 96
Figura 7.65 – Amostra preparada da argamassa com areia normal do IPT 96
Figura 7.66 – Amostra preparada da argamassa com rejeito 96
Figura 7.67 – Microscópio eletrônico de varredura FEG - Quanta 200 FEI, do CM/UFMG 97
Figura 7.68 – Micrografia em amostra serrada de uma região de interface da matriz da argamassa com grão de quartzo da areia normal (indicado); IES 98
Figura 7.69 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 98
Figura 7.70 – Micrografia em amostra serrada de uma região de interface da matriz da argamassa com grão de quartzo fraturado da areia normal (indicado); IER 99
Figura 7.71 – Espectrograma da microanálise referente à micrografia anterior 99
Figura 7.72 – Micrografias em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais euédricos; IER 100
Figura 7.73 – Micrografia em amostra serrada de região da interface com respectivas fases indicadas; IER 101
Figura 7.74 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 101
Figura 7.75 – Micrografia em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais subédricos; IER 102
Figura 7.76 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 102
Figura 7.77 – Micrografias em amostra serrada de região de interface #1 com intensa formação de cristais euédricos; IER 103
Figura 7.78 – Micrografias em amostra serrada de região de interface #2 com intensa formação de cristais subédricos; IER 103
Figura 7.79 – Estabelecimento da mescla para o concreto sem emprego do rejeito 106
Figura 7.80 – Estabelecimento da mescla para o concreto com emprego do rejeito 107
Figura 7.81 – Fase da adição pausada da solução água + aditivo 109
Figura 7.82 – Medida do abatimento pelo slump test 109
Figura 7.83 – Adensamento dos corpos de prova dos concretos em mesa vibratória 109
Figura 7.84 – Conjunto parcial dos corpos de prova moldados – traço com rejeito 109

Figura 7.85 – Corpos de prova dos concretos; à esquerda do concreto com rejeito e à direita o do concreto convencional, sem rejeito 109
Figura 7.86 – Corte transversal do corpo de prova do concreto 110
Figura 7.87 – Segmento cilíndrico do concreto sem rejeito 110
Figura 7.88 – Marcação de corte em corpo de prova do concreto com rejeito 110
Figura 7.89 – Equipamento de serra circular diamantada em operação 110
Figura 7.90 – Peça de um segmento cilíndrico após os cortes para confecção das amostras 111
Figura 7.91 – Amostra pronta do concreto sem rejeito, serrada, metalizada e montada no stub 111
Figura 7.92 – Amostra pronta do concreto com rejeito, serrada, metalizada e montada no stub 111
Figura 7.93 – Amostras prontas e metalizadas em carbono, obtidas em superfície de fratura nos dois concretos com cimento CP II – E 32 (com rejeito à esquerda) 111
Figura 7.94 – Amostras prontas e metalizadas em carbono, obtidas de superfície serrada nos dois concretos com cimento CP IV - 40 RS 112
Figura 7.95 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto, destacando em (d) a interface do agregado e matriz; a, b, d = IES; c = IER 113
Figura 7.96 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (d), (e) e (f) detalhes da microestrutura na zona de transição; a = IES; demais = IER 114
Figura 7.97 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto; IES 115
Figura 7.98 - Micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior, destacando detalhes da microestrutura da interface matriz/agregado; IES 116
Figura 7.99 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (d) destacando a sílica do agregado e o cálcio dos cristais de portlandita 116
Figura 7.100 – Sequência de micrografias em amostra de superfície de fratura de região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) e (d) detalhes da microestrutura na interface; IER 117
Figura 7.101 - Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER 118
Figura 7.102 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (b) 118
Figura 7.103 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto; IER 119
Figura 7.104 - Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER 120
Figura 7.105 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (c) destacando elemento de cristalização do cimento 120
Figura 7.106 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto; IER 121
Figura 7.107 – Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER 122
Figura 7.108 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior, destacando elemento de cristalização do cimento 122
Figura 7.109 – Micrografias de baixa ampliação (50x) em amostra serrada de concreto; IER 123

Figura 7.110 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) detalhes da microestrutura na interface; IER 124
Figura 7.111 – Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER 125
Figura 7.112 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior destacando a presença de elemento do rejeito 125
Figura 7.113 – Sequência de micrografias em superfície de fratura na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (d) detalhes da microestrutura na interface; IER 126
Figura 7.114 – Micrografias em superfície de fratura na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura na interface; IER 127
Figura 7.115 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 127
Figura 7.116 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto; IER 128
Figura 7.117 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto; detalhes da microestrutura; IES 129
Figura 7.118 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 129
Figura 7.119 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) detalhes da microestrutura; IES 130
Figura 7.120 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IES 131
Figura 7.121 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 131
Figura 7.122 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (e) e (f) detalhes da microestrutura; a, b,c = IER; d, e, f = IES 132
Figura 7.123 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) detalhes da microestrutura; IER 133
Figura 7.124 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IES 134
Figura 7.125 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 134
Figura 7.126 – Amostras semiprontas dos concretos com e sem rejeito, serradas, antes da metalização 135
Figura 7.127 – Amostras semiprontas dos concretos com e sem rejeito, fraturadas, antes da metalização 135
Figura 7.128 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER 136
Figura 7.129 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER 137
Figura 7.130 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 137
Figura 7.131 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (d) detalhes da microestrutura; IER 138
Figura 7.132 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER 139
Figura 7.133 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 139

Figura 7.134 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (a) e (b) detalhes da microestrutura em baixa ampliação (100x); IER 140
Figura 7.135 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (a) 140
Figura 7.136 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando-se em (b) detalhes da microestrutura; IER 141
Figura 7.137 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER 142
Figura 7.138 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 142
Figura 7.139 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) e (d) detalhes da microestrutura; IER 143
Figura 7.140 - Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura: IER 144
Figura 7.141 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 144
Figura 7.142 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (e), (f) e (g) detalhes da microestrutura; IER 146
Figura 7.143 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura: IER 147
Figura 7.144 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior 147
Figura 7.145 – Fase de retificação dos corpos de prova do concreto 150
Figura 7.146 – Detalhe das faces retificadas dos corpos de prova dos concretos 150
Figura 7.147 – Ensaio de um dos corpos de prova do concreto sem o rejeito 150
Figura 7.148 – Ensaio de um dos corpos de prova do concreto com rejeito 154
Figura 7.149 – Corpo de prova c/ rejeito posicionado no equipamento Erudite MKII – Resonant Frequency Test para o ensaio 158
Figura 7.150 – Módulo de leitura do equipamento Erudite MKII – Resonant Frequency Test 158
Figura 7.151 – Amostras dos concretos prontas para o ensaio de abrasão seca 161
Figura 7.152 – Etapa do ensaio de abrasão seca em amostra do concreto s/rejeito 162
Figura 7.153 – Croquis esquemático do equipamento de abrasão hídrica 166
Figura 7.154 – Projeto do abrasímetro hidráulico utilizado 167
Figura 7.155 – Cuba do abrasímetro em aço inox 168
Figura 7.156 – Vista da montagem do CP Ø 30 x 10 na base da cuba 168
Figura 7.157 – Tampa e conjunto motor do abrasímetro 168
Figura 7.158 – Equipamento abrasímetro completo, montado em laboratório 168
Figura 7.159 – Fase de moldagem dos corpos de prova Ø 30 x 10 dos concretos 169
Figura 7.160 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto s/rejeito após primeiro ciclo 170
Figura 7.161 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto s/rejeito após ciclo final 170
Figura 7.162 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto c/rejeito após primeiro ciclo 170
Figura 7.163 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto s/rejeito após ciclo final 170
Figura 7.164 – Estado comparativo dos corpos de prova Ø 30 x 10 após ciclos finais 170
Figura 7.165 – Fase durante a execução do ensaio 175
Figura 7.166 – Imagem de uma das condições em que ocorriam os ciclos de submersão e secagem de amostras do concreto em solução do sulfato de magnésio 179

Figura 8.167 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E – 32, a/c 0,63 183
Figura 8.168 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63 185
Figura 8.169 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 187
Figura 8.170 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63 189
Figura 8.171 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63 191
Figura 8.172 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 193
Figura 8.173 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63 195
Figura 8.174 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63 197
Figura 8.175 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 199
Figura 8.176 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63 201
Figura 8.177 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63 203
Figura 8.178 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 205
Figura 8.179 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63 207
Figura 8.180 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II 40 RS, a/c 0,63 209
Figura 8.181 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 211
Figura 8.182 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63 213
Figura 8.183 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63 215

Figura 8.184 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52 217
Figura 8.185 – Ocorrência da goethita terrosa, na partícula do rejeito, ilustrando aspecto de sua condição friável 222

Figura 10.186 – Vista geral de área de estoque do rejeito de *sinter* feed em pilhas 227

,

,,,,,

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência Resistência à Compressão 9
Tabela 4.2 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência Absorção de Água 10
Tabela 4.3 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência Desgaste por Abrasão 11

Tabela 5.4 – Exigências granulométricas para agregados miúdos 22
Tabela 5.5 – Exigências granulométricas para agregados graúdos 23
Tabela 5.6 – Classificação da forma de partículas de agregados 25
Tabela 5.7 – Limites para as substâncias deletérias em agregados para concreto 28

Tabela 6.8 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada – janeiro a julho de 2011 51
Tabela 6.9 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada – março a abril 2013 51
Tabela 6.10 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada – janeiro a junho 2015 52
Tabela 6.11 – Análise granulométrica #1 e caracterização física do rejeito de *sinter feed* 53
Tabela 6.12 – Curva granulométrica do rejeito e faixas ótima e utilizável do agregado miúdo 54
Tabela 6.13 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da areia utilizada 56
Tabela 6.14 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 0 57
Tabela 6.15 – Dados físicos da brita 1 58
Tabela 6.16 – Resultado dos ensaios de solubilização das amostras A e B e respectivos limites 59
Tabela 6.17 – Resultado dos ensaios de lixiviação das amostras C e respectivos limites 59
Tabela 6.18 – Ensaio de durabilidade do agregado 63
Tabela 6.19 – Ficha de resultados #1 71
Tabela 6.20 – Ficha de resultados #4 74
Tabela 6.21 – Ficha de resultados #5 75
Tabela 6.22 – Ficha do ensaio da areia normal do IPT 76

Tabela 7.23 – Comparativo de resistência à compressão das argamassas (MPa) CP II-E32 92
Tabela 7.24 – Ensaios comparativos de resistência à compressão simples – CP II – E 32, 151
Tabela 7.25 – Ensaios comparativos de resistência à compressão simples – CP IV – 40 RS, a/c = 0,63 152
Tabela 7.26 – Ensaios comparativos de resistência à compressão simples – CP IV – 40 RS, a/c = 0,52 153

Tabela 7.27 – Ensaios comparativos de tração por compressão diametral – CP II E-32, a/c = 0,63 155
Tabela 7.28 – Ensaios comparativos de tração por compressão diametral – CP IV - 40 RS, a/c = 0,63 156
Tabela 7.29 – Ensaios comparativos de tração por compressão diametral – CP IV - 40 RS, a/c = 0,52 157
Tabela 7.30 – Ensaios comparativos do módulo de elasticidade dinâmico – CPII E-32 159
Tabela 7.31 – Ensaios comparativos do módulo de elasticidade dinâmico – CP IV – 40 RS 159
Tabela 7.32 – Ensaios comparativos do módulo de elasticidade dinâmico – CP IV – 40 RS 160
Tabela 7.33 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (28 dias) – CP II E-32 162
Tabela 7.34 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (28 dias) – CP II E-32 162
Tabela 7.35 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (90 dias) – CP II E-32 163
Tabela 7.36 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (90 dias) – CP II E-32 163
Tabela 7.37 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS 163
Tabela 7.38 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS 163
Tabela 7.39 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS 164
Tabela 7.40 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS 164
Tabela 7.41 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS 164
Tabela 7.42 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS 164
Tabela 7.43 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS 165
Tabela 7.44 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS 165
Tabela 7.45 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (30 dias) CP II E-32 171
Tabela 7.46 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (41 dias) CP II E-32 171
Tabela 7.47 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (90 dias) CP II E-32 172
Tabela 7.48 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (105 dias) CP II E-32 172
Tabela 7.49 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (30 dias) CP IV – 40 RS 172
Tabela 7.50 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (44 dias) CP IV – 40 RS 172
Tabela 7.51 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (90 dias) CP IV – 40 RS 173
Tabela 7.52 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (104 dias) CP IV – 40 RS 173
Tabela 7.53 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (30 dias) CP IV – 40 RS 173
Tabela 7.54 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (40 dias) CP IV – 40 RS 173
Tabela 7.55 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (90 dias) CP IV – 40 RS 174
Tabela 7.56 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (102 dias) CP IV – 40 RS 174
Tabela 7.57 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (30 dias) CP II E-32 a/c=0,63 175
Tabela 7.58 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (90 dias) CP II E-32 a/c=0,63 175
Tabela 7.59 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (180 dias) CP II E-32 a/c=0,63 176
Tabela 7.60 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (30 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,63 176
Tabela 7.61 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (90 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,63 176
Tabela 7.62 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (180 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,63 176
Tabela 7.63 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (30 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,52 177
Tabela 7.64 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (90 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,52 177

Tabela 7.65 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (180 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,52 177
Tabela 7.66 – Ensaio de absorção por capilaridade (adicional) >210 dias – CP II E-32 após sulfato 180
Tabela 7.67 – Ensaio de absorção por capilaridade (adicional) >210 dias – CP IV 40 RS após sulfato 180
Tabela 7.68 – Ensaio de absorção por capilaridade (adicional) >210 dias – CP IV 40 RS sem sulfato 180

Tabela 8.69 – Percentuais de desempenho em relação ao traço referência (Sem Rejeito) 219

LISTA DE SÍGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	– constante
A%	– fator água/mistura seca, em porcentagem
a/c , x	– fator água/cimento
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
Absorç.	– absorção
Argam.	– argamassa
ARI	– Alta Resistência Inicial
ASTM	– American Society for Testing and Materials
BASF	– nome próprio, marca
BET	– ref. isotermas modelo de **B**runauer, **E**mmett e **T**eller
BF	– sigla em nome próprio
BH	– Belo Horizonte
BS	– British Standard
BSE	– elétrons retroespalhados
c/	– com
C_2S	– silicato bicálcico
C_3S	– silicato tricálcico
C_4AF	– ferroaluminato tetracálcico
$C_6AS_3H_{32}$ / C-A-S-H	– etringita
$Ca(OH)_2$	– hidróxido de cálcio
CETEC	– Centro Tecnológico de Minas Gerais
Com.	– Comércio
CONAMA	– Conselho Nacional de Meio Ambiente
Concr.	– concreto
CP	– Cimento Portland
CP	– corpo de prova
CP II – E 32	– cimento Portland composto com escória, classe 32
CP IV - 40 RS	– cimento Portland pozolânico, classe 40, resistente a sulfatos
C-S-H	– silicatos de cálcio hidratados
DEMC	– Departamento de Engenharia de Materiais e Construção
DEMET	– Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
DEMIN	– Departamento de Engenharia de Minas
Dep.	– depósito
Dif.	– diferença
DNSST	– Departamento Nacional de Segurança e Saúde do Trabalhador
EDS	– espectroscopia de raios-X por dispersão de energia

EE	– Escola de Engenharia
ES	– elétrons secundários
f_c	– resistência à compressão do concreto
Fe	– ferro
FEG	– field emission gun
FEI	– nome próprio, marca
FEUP	– Fundação Engenharia Universidade do Porto
FUMEC	– Fundação Mineira de Educação e Cultura
hs.	– horas
IBEC	– Insumos Básicos Especiais para Concreto (nome próprio)
IBEC	– Insumos Básicos Especiais para Concreto (nome próprio)
IER	– Imagem de elétrons retroespalhados, no MEV
IES	– imagem de elétrons secundários, no MEV
Ind.	– Indústria
Intertr.	– intertravado
IPT	– Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISSN	– International Standard Serial Number
ITM	– Itaminas
IUPAC	– International Union of Pure and Applied Chemistry
IZT	– interface na zona de transição
KOH	– hidróxido de potássio
Ltda.	– Limitada
MBR	– Minerações Brasileiras Reunidas
MEV	– microscopia (ou microscópio) de varredura de feixe de elétrons
MG	– Minas Gerais
min.	– minuto
Mn	– manganês
NaOH	– hidróxido de sódio
NBR	– Norma Brasileira
Ref. - Refer.	– referência
s/	– sem
Sat.	– saturado
sic	– assim, dessa forma
SSS	– saturado de superfície seca
Sta.	– Santa
TUP	– traço unitário em peso
UFMG	– Universidade Federal de Minas Gerais
UR	– umidade relativa
x	– relação sólidos-espaço

LISTA DE UNIDADES

%	–	percentual
℃	–	grau centígrado
Å	–	angstrom (10^{-10} metros)
cm^3	–	centímetro cúbico
CV	–	potência em cavalos
f_{c28}	–	resistência à compressão aos 28 dias
GPa	–	gamaPascal
g	–	grama
kg	–	quilograma
kg/dm^3	–	quilograma por decímetro cúbico
kgf	–	quilograma força
kHz	–	quilohertz, unidade de frequência
kp	–	unidade de força centrífuga = daN
m^2	–	metro quadrado
m^2/g	–	metro quadrado por grama
m^3	–	metro cúbico
m^3/dia	–	metro cúbico por dia
mg/l	–	miligrama por litro
mg/m^3	–	miligrama por metro cúbico
mm	–	milímetro (10^{-3} metros)
MPa	–	megaPascal
Ø	–	diâmetro
p/p_o	–	pressão relativa (pressão inicial / pressão de condensação)
t	–	tonelada
t/dia	–	tonelada por dia
t/mês	–	tonelada por mês
ηm	–	nanômetro (10^{-9} metros)
µm	–	micrometro (10^{-6} metros)

RESUMO

Contexto: O rejeito de minério gerado em mineradoras tem criado enormes problemas. Sua utilização como material agregado para a produção de concreto e argamassas, em substituição total ou parcial às areias convencionalmente utilizadas, é questão pouco estudada, mas pode dirimir despesas às mineradoras em seu estoque, controle e descarte, além de beneficiar o meio ambiente de maneira significativa. **Objetivos:** Realizar estudos comparativos em uma argamassa e concretos produzidos com o rejeito de minério de ferro gerado no processo de produção do *sinter feed,* em relação aos seus correspondentes produzidos com agregados convencionais. Avaliar as microestruturas correspondentes e realizar ensaios físicos, validando o emprego desse rejeito em substituição parcial ou total das areias naturais, em argamassa e concreto. **Materiais:** Rejeito de *sinter feed* produzido por processamento em instalação de jigagem, cimentos Portland CP II-E 32 e CP IV-40 RS, areia normal do IPT, areia comum quartzosa lavada média, britas calcárias 0 e 1, aditivo plastificante polifuncional e água comum. **Métodos:** Foi caracterizado o rejeito final do minério de ferro por análises granulométricas, de área superficial específica e de porosimetria de adsorção/condensação de nitrogênio e, realizadas análises mineralógicas e microestruturais. Foram moldados corpos de prova de argamassa e concreto produzidos com e sem o rejeito. Em ambas as amostras, foram realizadas análises microestruturais por microscopia eletrônica de varredura e microanálise por dispersão de energia. Foram também feitos ensaios comparativos de resistência à compressão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico, abrasão seca e sob água e de absorção por capilaridade nas amostras de concreto. **Resultados:** Foi cotejado para cada ensaio físico realizado, em cada traço de concreto com o rejeito e em suas respectivas idades, o percentual superior ou inferior do desempenho observado em relação àquele do seu traço de referência (sem o emprego do rejeito). Também foram destacados qualitativamente os valores de desempenhos, considerados superiores ou inferiores, conforme positivo ou negativo o valor de seu percentual comparativo. **Conclusão:** É viável o emprego do rejeito de *sínter feed* como coadjuvante integrante das mesclas dos agregados na produção de concretos em circunstâncias e finalidades específicas, não apenas em função de suas características e dos desempenhos observados, mas principalmente pelas conveniências ecológicas e

de sustentabilidade que seu emprego propicia. Fica comprovado emprego do rejeito de *sínter feed* na produção de concretos convencionais (f_{ck} até 30MPa). O uso do rejeito de *sinter feed* como agregado nos concretos de consistência plástica, com relação à melhoria de seu desempenho na abrasão hídrica, carece de avaliação mais ampla, inclusive, quanto à caracterização específica e escolha do rejeito do *sinter feed* empregado (incidência das variedades conhecidas do mineral goethita). A microestrutura da interface pasta/agregado da argamassa e dos concretos produzidos com o rejeito de *sinter feed* apresenta as fases cimentícias hidratadas euédricas pouco desenvolvidas, mostrando certo atrofiamento em sua morfologia clássica.

Palavras-chave: Rejeito. S*inter feed*. Argamassa. Concreto. Microestrutura. Interface da zona de transição.

ABSTRACT

Context: The iron ore tailings generated at mining companies has created enormous problems. Their use as aggregate material for the production of concrete and mortars, in total or partial replacement to sands conventionally used, is a little studied matter, but can settle costs to mining companies in their inventory, control and disposal, besides benefiting the environment significantly. **Objectives:** Develop comparative studies in mortar and concrete produced with the iron ore tailings generated in the sinter feed production process in relation to their corresponding ones produced with conventional aggregates. Evaluate the corresponding microstructures and carry out physical tests to validate the use of these tailings in natural sands partial or total replacement in mortar and concrete. **Materials:** Sinter feed tailings produced by processing in a jigging facility, Portland CP II-E 32 and CP IV-RS 40, IPT normal sand, medium size common washed quartz sand, limestone grit 0 and 1, multifunctional plasticizer additive and tap water. **Methods:** The final iron ore tailings were characterized by grain size analysis, specific surface area and porosimetry by nitrogen adsorption/condensation and mineralogical and microstructure analysis. Molded specimens of mortar and concrete were made with and without the tailings. Microstructure analyses by scanning electron microscopy and energy-dispersive microanalysis were done on both samples. The following comparative physical tests have been carried out, as well: resistance to compression, traction by diametral compression, dynamic modulus, dry abrasion and under water and capillarity absorption in the concretes' samples. **Results:** It was detailed for each physical test held, in each concrete mix with the tailings and in their respective ages, the percentage above or below the performance observed in relation to the concrete reference mix (without tailings use). The performances values were also qualitatively highlighted, considered superior or inferior as positive or negative the value of the comparative percentage. **Conclusion:** The use of sinter feed tailings as a secondary member of the blends of aggregates in concrete production is considered feasible, under specific circumstances and purposes, not only in terms of their observed characteristics and performances, but mainly due to the ecological and sustainability conveniences offered by its use. The employment of the sinter feed tailings in the production of conventional concrete (fck until 30MPa) is proven. The use of sinter feed tailings as an aggregate in plastic consistency concrete, with respect to improving its performance in hydric abrasion needs further review, including specific characterization

and the choice of the specific sinter feed tailings (presence different varieties of the mineral goethite). The microstructure of the paste/aggregate interface of the mortar and the concretes produced with the sinter feed tailings presents the euhedral hydrated cement phases little developed, showing some shrinking as compared to its classic morphology.

Keywords: Tailings. Sinter feed. Mortar. Concrete. Microstructure. Transition interface zone.

1. INTRODUÇÃO

A busca por uma destinação útil aos resíduos e rejeitos oriundos da produção de indústrias siderúrgicas e mineradoras tem sido uma preocupação constante por parte das empresas que se dedicam a estas atividades, de ambientalistas, bem como órgãos de controle e instituições de pesquisas, interessados na preservação do meio ambiente. Assim é, por exemplo, que se conhece na área da siderurgia o grande avanço estabelecido com o aproveitamento de determinadas escórias como componentes importantes para produção de alguns tipos de cimentos Portland, contribuindo para significativas economias em sua produção, melhoria de suas características e, principalmente, para a utilização inteligente de resíduos gerados de vários tipos de indústrias siderúrgicas (COSTA, 2009).

Segundo COSTA (2009), também na área da mineração de calcário e gnaisse, aquilo que um dia foi rejeito na produção das britas para emprego nos concretos, hoje, graças a pequeno investimento e estabelecimento de mais uma ou outra fase de beneficiamento das frações finas da britagem, constitui-se com crescente aceitação pelo mercado nas areias artificiais. As areias calcáreas, por exemplo, com o seu emprego substituindo parte das areias naturais provenientes dos rios, incorpora significativas melhorias nas propriedades dos concretos e argamassas, ao mesmo tempo em que estabelece também uma desejável economia no consumo deste bem natural, finito e não renovável. Não apenas nos setores da mineração e siderurgia, mas também na própria construção civil a busca constante pelo aproveitamento de seus rejeitos e resíduos ocupa hoje lugar de destaque na pesquisa e busca de tecnologia de novos materiais que contribuam para a sustentabilidade ambiental. Nas palavras de ALCÂNTARA (2009), com o desenvolvimento das cidades, a ação do homem sobre o meio ambiente resultou na degradação dos recursos naturais e na poluição, comprometendo sua própria qualidade de vida. No século XXI é tarefa dos profissionais da construção civil a adequação dos princípios da construção sustentável ao cotidiano do trabalho, pois é grande a responsabilidade e a parcela deste setor no desenvolvimento sustentável.

A areia natural quartzosa, seja de barranco ou de rio, é obtida por meio de processos de desmonte ou dragagem, respectivamente. Ambos os casos contribuem enormemente para a degradação ambiental dos locais e das cercanias de sua

exploração, geralmente próximo aos grandes centros urbanos. A degradação do meio ambiente devido à extração de areia caracteriza-se, principalmente, pela retirada da cobertura vegetal, grande erosão das áreas exploradas, assoreamento dos leitos hídricos e significativa alteração paisagística. A areia natural constitui um bem finito e não renovável e tem sido um material cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades, além, evidentemente, da sua heterogeneidade. Sua obtenção em locais mais distantes aumenta significativamente o custo de transporte.

Nas aplicações pioneiras de indústrias mineradoras, os rejeitos de sua produção e beneficiamento eram descartados em grandes volumes nos leitos dos rios, tendo os procedimentos de disposição evoluídos para sistemas de contenção, realizados sem qualquer controle. Entretanto, com o avanço das legislações ambientais e, principalmente, após o registro de rupturas de barragens e pilhas de rejeitos associadas a grandes impactos ambientais, as empresas mineradoras passaram a conceber esses sistemas como obras de engenharia. Por consequência, passaram a destinar maior interesse no atendimento à legislação no sentido de alternativas mais seguras para a contenção de seus resíduos (PEREIRA, 2005). Neste contexto o aproveitamento de rejeitos surge como fator de redução de custos das mineradoras, fonte adicional de renda e atitude de melhoria da qualidade ambiental. Os principais processos de aglomeração são sinterização e pelotização. Na sinterização são obtidos minérios *sínter feed* (0,15 a 6,35mm) e na pelotização são obtidos minérios *pellet feed* (menores que 0,15mm) (QUARESMA, 2001). Na produção do *sínter feed*, que é destinado às usinas siderúrgicas de aço, é gerado um rejeito particulado, de granulometria próxima e semelhante à das areias naturais.

2. OBJETIVOS

A partir de estudos comparativos desenvolvidos em uma argamassa e concretos produzidos com o rejeito de minério de ferro gerado no processo de produção do *sinter feed,* em relação aos seus correspondentes produzidos com agregados convencionais, o objetivo geral do trabalho é validar o emprego desse rejeito em substituição parcial ou total das areias naturais, em argamassa ou concreto.

Tem como objetivos específicos:

- Caracterizar, fisicamente, o novo rejeito final do minério de ferro, por meio de análises granulométricas, de área superficial específica e de porosimetria de adsorção/condensação de nitrogênio;
- Realizar análises mineralógicas e microestruturais no rejeito;
- Moldar corpos de prova de argamassa e concreto produzidos com e sem o material em estudo para atender os ensaios físicos comparativos previstos;
- Desenvolver análise microestrutural em ambas as amostras dos corpos de prova produzidos, avaliando a microestrutura da interface pasta-agregado com a utilização da microscopia eletrônica de varredura convencional; utilizar a microanálise por dispersão de energia durante estes estudos;
- Enfatizar os aspectos microestruturais referentes à interface entre a pasta e os agregados, tanto no rejeito como na areia utilizada;
- Ampliar os estudos estabelecendo ensaios comparativos de resistência à compressão, módulo de elasticidade e de abrasão sob água [*Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)* – ASTM C 1138], entre outros, nos concretos produzidos com e sem este agregado, o rejeito de *sinter feed*.

3. JUSTIFICATIVA

Uma pesquisa deve, em seu objetivo final, oferecer ao homem e à sociedade informações, avanços tecnológicos e melhorias sistêmicas que se traduzam em toda a gama possível de vantagens, notadamente no que tange a custos. A aplicabilidade e eventuais vantagens do emprego desta tecnologia em obras e construções sujeitas aos vários tipos de abrasão poderão ser relevantes. Na pavimentação, suas vantagens foram inequívocas, o que já foi demonstrado por COSTA (2009).

Na construção civil essa aplicação pode ser estendida aos blocos de concreto para alvenarias, assentes sobre o terreno em baldrames ou sapatas corridas, onde o aumento de peso do agregado não representa qualquer inconveniente. Nas estruturas de contenção em alvenaria, ao contrário, o aumento de peso decorrente do agregado é fator preponderante de melhoria do desempenho destas construções.

No saneamento básico, em galerias de esgotos e águas pluviais onde, periodicamente, são demandadas ações de recuperação estrutural devidas ao desgaste por abrasão hídrica, esta pesquisa tende a trazer informações e alternativas que, uma vez comprovadas, poderão alterar o quadro de periodicidade dessas intervenções, estabelecendo prazos mais longos de recuperação gerando, consequentemente, economias significativas.

Nos diversos ramos das indústrias, especialmente as ligadas ao emprego do concreto, o campo poderá ser vasto e outras aplicabilidades importantes poderão ser vislumbradas no decorrer ou a partir desta pesquisa.

4. HISTÓRICO - ESTADO DA ARTE

A utilização do rejeito de minério gerado em mineradoras como material agregado para a produção de concreto e argamassas, em substituição total ou parcial às areias convencionalmente utilizadas, é prática razoavelmente inédita. As poucas experiências que se conhece limitaram-se a casos isolados, de motivação muito específica e guardam alguma semelhança com o material objeto da presente pesquisa.

Uma das primeiras, senão a primeira de fato, teve como origem a busca por parte do jornalista e ambientalista mineiro Flávio Passos em sanar as consequências de um grave acidente ambiental ocorrido após o rompimento de uma barragem de rejeito do consórcio minerador Somil / Rio Verde / MBR, na região do município de São Sebastião de Águas Claras (Macacos), vizinho a Belo Horizonte, no ano de 1969. Constituiu-se na destinação e aproveitamento final do material oriundo deste acidente, denominado no setor de mineração de ferro como 'finos de barragem', em complemento das atividades de desassoreamento e recuperação ambiental do leito do Córrego da Alegria, seriamente comprometido devido ao referido rompimento. Não apenas o Córrego da Alegria, mas toda a bacia hídrica do município ficou comprometida com a imensa deposição deste rejeito de minério no leito de seus córregos e riachos.

Nascia, assim, o Pavieco, um bloquete destinado à pavimentação local de ruas daquele município, produzido com este material retirado dos leitos dos córregos afetados. Contendo impurezas orgânicas e contaminações vegetais diversas, recebeu um breve beneficiamento (peneiramento) no local da pequena planta de produção instalada no município de Macacos/MG e, a partir daí, constituiu-se no agregado miúdo com o qual foram produzidas as primeiras peças pré-fabricadas do bloquete, para o pavimento do tipo intertravado (Fig.4.1, 4.2).



Figura 4.1 – Instalação de peneiramento para produção do Pavieco
Fonte: Arquivo pessoal, Jornalista Flávio Passos, 1995.

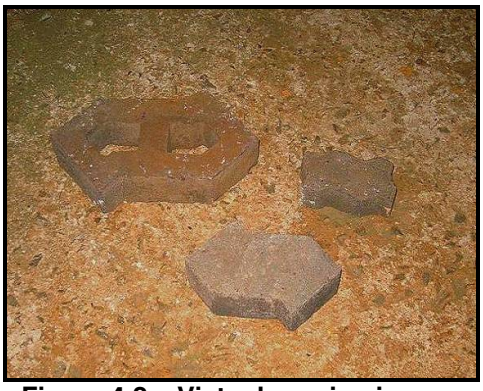


Figura 4.2 – Vista dos primeiros tipos de Pavieco produzidos
Fonte: O autor, 2007.

Alguns anos mais tarde, em 1996, esse material foi novamente utilizado em caráter experimental na produção de peças de bloquete instaladas em um trecho de pavimentação da Rua Monte Vista, no bairro Jardim Canadá, em Nova Lima/MG, executada pela MBR como parte de ações compensatórias em contrapartida à instalação da Mina de Capão Xavier naquela região (Fig.4.3).



Figura 4.3 – Vista de trecho do bairro Jd. Canadá em Nova Lima pavimentado com bloquetes produzidos com material semelhante ao da presente pesquisa
Fonte: O autor, 2007.

Mais recentemente, há informações acerca de emprego semelhante de um rejeito de minério no Instituto Cultural Inhotim, no vizinho município de Brumadinho. Trata-se de um espaço cultural internacionalmente conhecido e referido, que abriga um museu de arte contemporânea, um jardim botânico e extenso acervo ambiental, no qual também vêm sendo aplicadas peças pré-fabricadas com a utilização de rejeito de minério em áreas de sua pavimentação interna (Fig.4.4, 4.5).



Figura 4.4 – Vista da área de estoque de bloquetes produzidos com rejeito de minério em Inhotim



Figura 4.5 – Vista de trecho de pavimentação em Inhotim com bloquetes produzidos com rejeito de minério de ferro

Fonte: MENEZES, 2012.

Estas poucas experiências práticas foram e vêm sendo desenvolvidas sem maiores cuidados experimentais e sem o necessário estudo científico-tecnológico do material rejeito e de seu comportamento no compósito concreto ou argamassa.

A falta destes estudos e da fundamentação da utilização deste rejeito foi um dos fatores motivadores que estimularam o desenvolvimento da dissertação de mestrado 'Utilização do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção de peças de concreto para pavimentação' por COSTA (2009). No desenvolvimento de seu trabalho, com características de pesquisa em tema inédito, o autor estabeleceu seus estudos em metodologia pré-estabelecida e nos respectivos resultados obtidos em ensaios laboratoriais de caracterização do rejeito. Posteriormente, foram realizados ensaios de desempenho de um produto piloto predeterminado, produzido com o referido resíduo.

O produto piloto escolhido foi o *Paver 8*, um bloquete com forma de paralelepípedo, com dimensões nominais de (200 x 100 x 80)mm, produzido por uma empresa cuja indústria detém uma significativa aceitação de seus produtos em nosso mercado. Na referida pesquisa, dentre os traços de concreto estudados, vibroprensados, foram eleitos três, correspondentes a três das cinco mesclas granulométricas estudadas que apresentaram maior proximidade com a mescla do traço utilizado na produção corrente da indústria, tomado como o de referência.

O traço do concreto informado e utilizado na produção dos bloquetes pela indústria, por betonada alimentada, constituía-se de:

- 2 giricas de areia, aproximadamente 400kg;
- 1 girica de pó de pedra, aproximadamente, 200kg;
- 1 girica de brita 0, aproximadamente, 200kg;
- 160kg de cimento CP V–ARI, Holcim;
- 59 litros de água e
- 5 litros de solução do aditivo plastificante (Rehomix 610), composta por 20 litros do concentrado em 180 litros de água (≈ 3% sobre o peso do cimento). Desta forma, o fator água/cimento calculado equivalia a 0,397.

Entre cinco mesclas estudadas com a utilização do rejeito foram estabelecidos os três traços seguintes, efetivamente, utilizados nos procedimentos do referido trabalho:

1. **Traço 1:** com 75% de rejeito + 25% de areia;
2. **Traço 2:** com 50% de rejeito + 50% de areia - *traço cuja mescla granulométrica mais se aproximou da mescla de referência*;
3. **Traço 3:** com 50% de rejeito + 25% de areia + 25% de pó de pedra.

Os resultados foram estimulantes em todos os sentidos, especialmente no que tange à resistência à abrasão das peças produzidas, medida por meio do abrasímetro tipo Amsler (desgaste em disco salpicado com areia quartzosa), no qual se obteve um desempenho extraordinário.

A Tabela 4.1 retrata o desempenho dos concretos estudados quanto à resistência à compressão dos traços analisados.

Em seguida, a Tabela 4.2 apresenta o desempenho dos concretos estudados quanto à absorção de água.

A Tabela 4.3 retrata o desempenho dos concretos quanto ao desgaste por abrasão, verificação desenvolvida a partir de peças produzidas com os traços utilizando o rejeito, comparativamente com as peças produzidas utilizando traço de um concreto da produção corrente de uma indústria (IBEC) sediada na Grande BH.

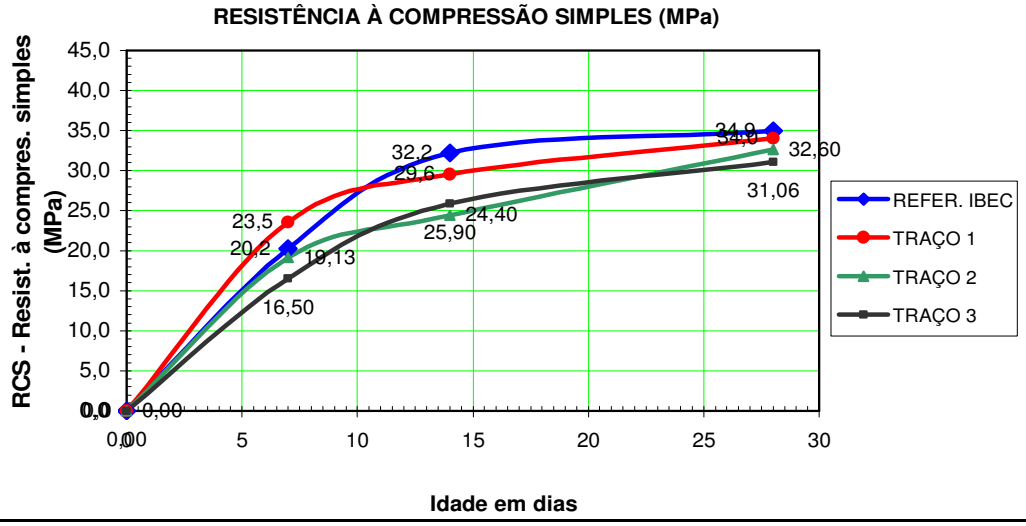
Tabela 4.1 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência
Resistência à Compressão

	COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				
INFORMAÇÕES GERAIS	**MATERIAL**	**PAVER 8**	**PAVER 8**	**PAVER 8**	**PAVER 8**
	IDENTIFICAÇÃO	**Refer. IBEC**	**Traço 1**	**Traço 2**	**Traço 3**
	NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa
	ORIGEM	Ibec	Ibec	Ibec	Ibec
	PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO	3,366	3,845	3,585	3,575
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78
	DATA FABRICAÇÃO	23/5/2008	29/8/2008	29/8/2008	9/7/2008
	UTILIZAÇÃO	Pavimentação	Pavimentação	Pavimentação	Pavimentação

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES **(MPa)**

Identificação dos Traços		RESULTADOS COMPARATIVOS DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA							
		REFER. IBEC		**TRAÇO 1**		**TRAÇO 2**		**TRAÇO 3**	
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
IDADES EM DIAS	**0**								
		0,00		**0,00**		**0,00**		**0,00**	
	7								
		20,22		**23,54**		**19,13**		**16,50**	
	14								
		32,21		**29,55**		**24,40**		**25,90**	
	28								
		34,92		**34,02**		**32,60**		**31,06**	

CURVAS DE RESISTÊNCIA DA ARGAMASSA POR TRAÇO UTILIZADO



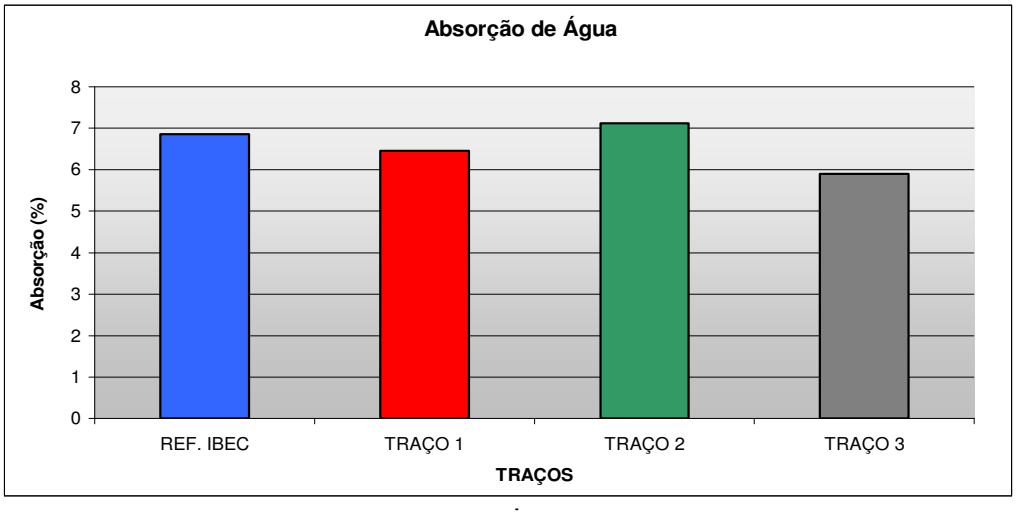
OBSERVAÇÕES:

Fonte: COSTA, 2009.

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência Absorção de Água

COMPARATIVO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA					
INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8
	MATERIAL	Refer. IBEC	Traço 1	Traço 2	Traço 3
	INDÚSTRIA	Ibec	Ibec	Ibec	Ibec
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO (Kg)	3,366	3,845	3,585	3,575
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78
	DATA FABRICAÇÃO	23/5/2008	29/8/2008	29/8/2008	9/7/2008
	UTILIZAÇÃO	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.

ABSORÇÃO DE ÁGUA					
Identificação dos traços		RESULTADOS DE ABSORÇÃO (%)			
		Absorção Média das Amostras por traço			
TRAÇOS	REF. IBEC				
		6,86			
	TRAÇO 1				
		6,46			
	TRAÇO 2				
		7,12			
	TRAÇO 3				
		5,90			



OBSERVAÇÕES:

Corpos de prova com idades de 28/30 dias

Peso seco em estufa: após 24 horas de secagem

Fonte: COSTA, 2009.

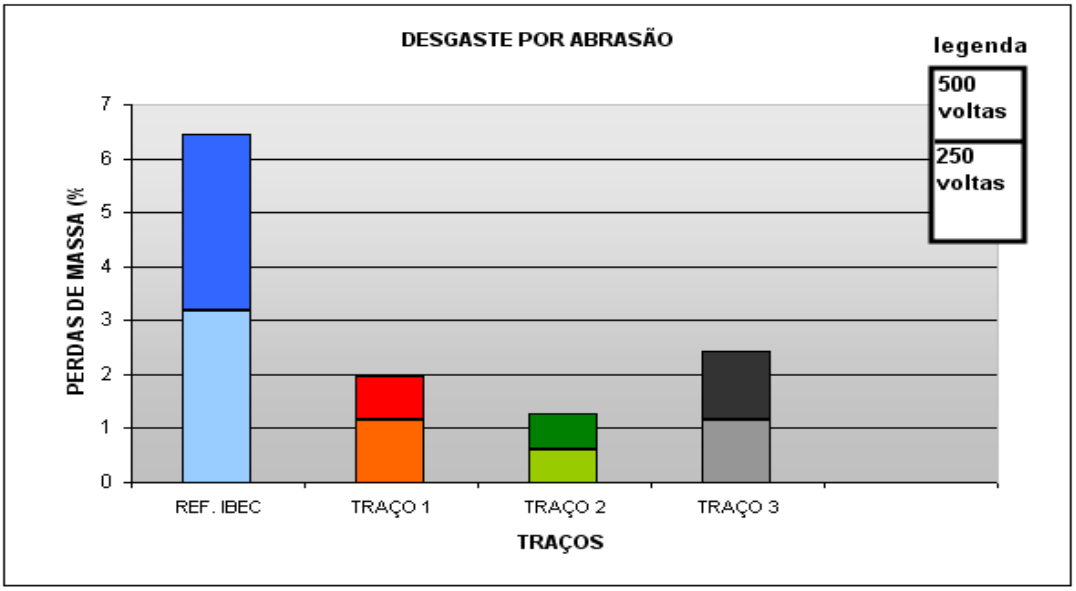
Tabela 4.3 – Resumo dos resultados dos traços da pesquisa x traço de referência Desgaste por Abrasão

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO

	PEÇA	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8	PAVER 8
INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL	Refer. IBEC	Traço 1	Traço 2	Traço 3
	INDÚSTRIA	Ibec	Ibec	Ibec	IBEC
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa	Pesquisa
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO (Kg)	3,366	3,845	3,585	3,575
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80	200 x 100 x 80
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78	198 x 98 x 78
	DATA FABRICAÇÃO	23/5/2008	29/8/2008	29/8/2008	9/7/2008
	UTILIZAÇÃO	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.	Pavimento Intertr.

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO

Identificação dos Traços		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)	
		250 voltas = 500m	500 voltas = 1000m
		Desgaste Médio das Amostras por traço	
TRAÇOS	Ref. IBEC	3,19	6,45
	Traço 1	1,15	1,98
	Traço 2	0,62	1,26
	Traço 3	1,16	2,42



OBSERVAÇÕES:

Corpos de prova extraídos de bloquetes com idade de 28/30 dias

Massas expressas em gr.

Fonte: COSTA, 2009.

Os desempenhos alcançados com os estudos desenvolvidos em concretos utilizando o rejeito de *sinter feed*, naquela especificidade, determinaram o interesse na publicação do tema, o qual foi objeto de tratamento editorial parcial e apresentado em artigo na Segunda Conferência Internacional sobre Materiais de Construção Sustentável e Tecnologias[1], evento promovido pela Coventry University e UWM Centro para Utilização de Subprodutos, em junho de 2010, na Universidade Politécnica delle Marche, na Itália.

Posteriormente, um extrato deste trabalho foi preparado e publicado no periódico Construindo (ISSN 2175-7143), volume 04, número 02, jul./dez. 2012, Revista Científica dos Programas de Pós-graduação em Construção Civil, editada e publicada pela Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade FUMEC, Escola de Engenharia da UFMG e Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Portugal.

Já mais recentemente um novo conteúdo desse estudo foi preparado, submetido e publicado pelo periódico Ibracon Structures and Material Journal, Revista Ibracon de Estruturas e Materiais (ISSN 1983-4195), volume 7, number 2, April 2014, periódico de origem nacional, de referência e alcance internacional.

Na ampla busca por estudos, publicações e pesquisas sobre o tema em publicações e entidades de registro tecnológico/científico, não se encontrou, até o início desta pesquisa (2012), nem em sua finalização (2016), qualquer outro trabalho pertinente, bem como não se localizou também qualquer registro de eventual patente.

A grande relevância do uso do rejeito de *sinter feed* como agregado na produção de peças de concreto se refere ao desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil. Semelhantemente ao surgimento das areias artificiais originadas do beneficiamento dos resíduos da britagem dos calcários e gnaisse, o aproveitamento desse resíduo virá constituir-se, também, em mais uma interessante alternativa para substituição das areias naturais, nas áreas de sua aplicabilidade. A substituição das areias naturais, um bem finito e cada vez mais escasso no entorno das grandes cidades, além de conduzir à possibilidade de redução na sua demanda, com implicação direta na redução das áreas de sua exploração, contribuindo para a

[1] Disponível em: www4.uwm.edu/cbu/ancona.html.

minoração da degradação da natureza e dos impactos ambientais nos sítios de sua exploração, constitui ação e tecnologia perfeitamente alinhadas ao conceito de sustentabilidade.

Pelo lado das indústrias mineradoras, o descarte desse rejeito de maneira produtiva significará relevante relação custo-benefício, que se caracterizará pela eliminação tanto das grandes pilhas em suas áreas de descarte de rejeitos, como se vê na Figura 4.6 a seguir, quanto pela ausência dos respectivos custos com sua operacionalização e manutenção.



Figura 4.6 – Vista da dimensão de uma das pilhas de estoque (rejeito de *sinter feed*)
Fonte: O autor, 2008.

As análises e as conclusões obtidas nos estudos anteriormente referidos representam o estado da arte alcançado no conhecimento e desenvolvimento do emprego desse material como agregado para o concreto e argamassas.

A ocorrência de goethita como um dos minerais mais abundantes no rejeito, com características de 'pouco a muito porosa', é um dos fatores que instigou o avanço desta pesquisa, especialmente na interface agregado/pasta de cimento de forma comparativa com as situações de utilização de agregados de uso corrente em nossas obras, visando o seu completo conhecimento face às várias aplicações que se pretende estabelecer.

Ao discorrer sobre propriedades e conveniência dos agregados e enfocando, particularmente, os agregados pesados (*heavy weight aggregates*), MINDES *et al*. (2002) consideram que esses não são dirigidos especialmente para blindagem de radiação, mas podem também ser usados para aplicações em que uma elevada

proporção massa/volume é desejável (contrapesos, por exemplo). Citam em tabela uma lista dos principais materiais que constituem os agregados pesados, encabeçada pela goethita, barita, hematita, dentre outros, sendo a goethita o mais leve.

Aqui se ampliam as considerações desse entendimento e cita-se experiência efetiva desenvolvida em peças para pavimentação e vislumbram-se, em princípio, outras aplicações que não somente os contrapesos.

METHA e MONTEIRO (2006) consideram que o conhecimento e domínio de certas características dos agregados são importantes na definição das dosagens dos concretos e argamassas. Aspectos como a porosidade ou massa específica, granulometria, forma e textura superficial das partículas influem e definem de forma preponderante nas propriedades do concreto fresco, ou sua reologia.

Já a sua composição mineralógica afeta sua resistência, o módulo de elasticidade e sua dureza, entre outras características que, por sua vez, vão influenciar outras propriedades do concreto endurecido que contenha o agregado (SANTOS; BRANDÃO, 2003).

Em função desse acúmulo de aspectos e comportamentos, tanto no estado fresco como no endurecido, METHA e MONTEIRO (2006) recomendam a divisão do estudo das propriedades dos agregados em três categorias a partir de características microestruturais e de seu processamento (detalhadas adiante neste estudo, item 5.2):

- *Características decorrentes de sua porosidade;*
- *Características decorrentes do seu processo produtivo e*
- *Características decorrentes da sua composição químico-mineralógica.*

A Figura 4.7 ilustra de forma macroscópica o rejeito objeto da presente pesquisa.



Figura 4.7 – Aspecto do rejeito de *sinter feed* objeto desta pesquisa
Fonte: O autor, 2013.

É no ambiente da interface (zona de transição) da pasta de cimento hidratado (no item 5.2 adiante detalhado) - superfície do agregado – que se situa o foco da presente tese, para buscar o estudo comparativo e o conhecimento de suas especificidades em duas situações bem definidas: com agregados de emprego corrente em nossos concretos e obras da engenharia civil e com agregados oriundos dos rejeitos das atividades de mineração, na produção do *sinter feed*.

No desenvolvimento a seguir é apresentado o referencial teórico nos vários aspectos pertinentes ao tema, explorando as abordagens relativas à microestrutura da fase agregado, bem como da microestrutura da pasta de cimento hidratada e suas respectivas interações.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O termo ‘agregado’ é de uso generalizado na tecnologia do concreto. É o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas com extensa gama de tamanhos. É obtido a partir de rochas compactas que ocorrem em depósitos geológicos – jazidas, existentes na natureza, ou em depósitos de sedimentos inconsolidados, como o caso dos cascalhos, seixos rolados e areias naturais. É processado (caso das britas e areias artificiais) por meio de fracionamento, britagem, de rochas e graduado, selecionado por peneiramento, estabelecendo-se as mais variadas granulometrias adequadas ao emprego pretendido. Para as areias naturais, sua obtenção ocorre por processos de desmonte ou dragagem.

Os primeiros estudos e concepção acerca dos concretos tinham como consideração inicial que os agregados cumpriam unicamente o papel de enchimento no material, sendo suas características totais reguladas pela parte ativa da mistura, o cimento e suas particularidades, antes, durante e após suas reações de hidratação e endurecimento. Com o desenvolvimento dos estudos e o avanço da Tecnologia do Concreto e Argamassas, alcançou-se o conceito atual de que os agregados cumprem função importante nas misturas das quais participam, sendo responsáveis por uma série de comportamentos, desempenhos e características desse compósito.

5.1. Microestrutura da fase agregado

É necessário conhecer certas características dos agregados (massa específica, composição granulométrica e teor de umidade) para a definição das dosagens de concreto. As propriedades do concreto no estado fresco são determinadas pela porosidade ou massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial. Além da porosidade, a composição mineralógica do agregado afeta sua resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade que, por sua vez, influenciam várias propriedades do concreto endurecido que contenha o agregado. Em síntese, “as características do agregado que são importantes para as propriedades do concreto decorrem da microestrutura da rocha matriz, condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado” (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.273). O diagrama da Figura 5.8 ilustra as várias interrelações.

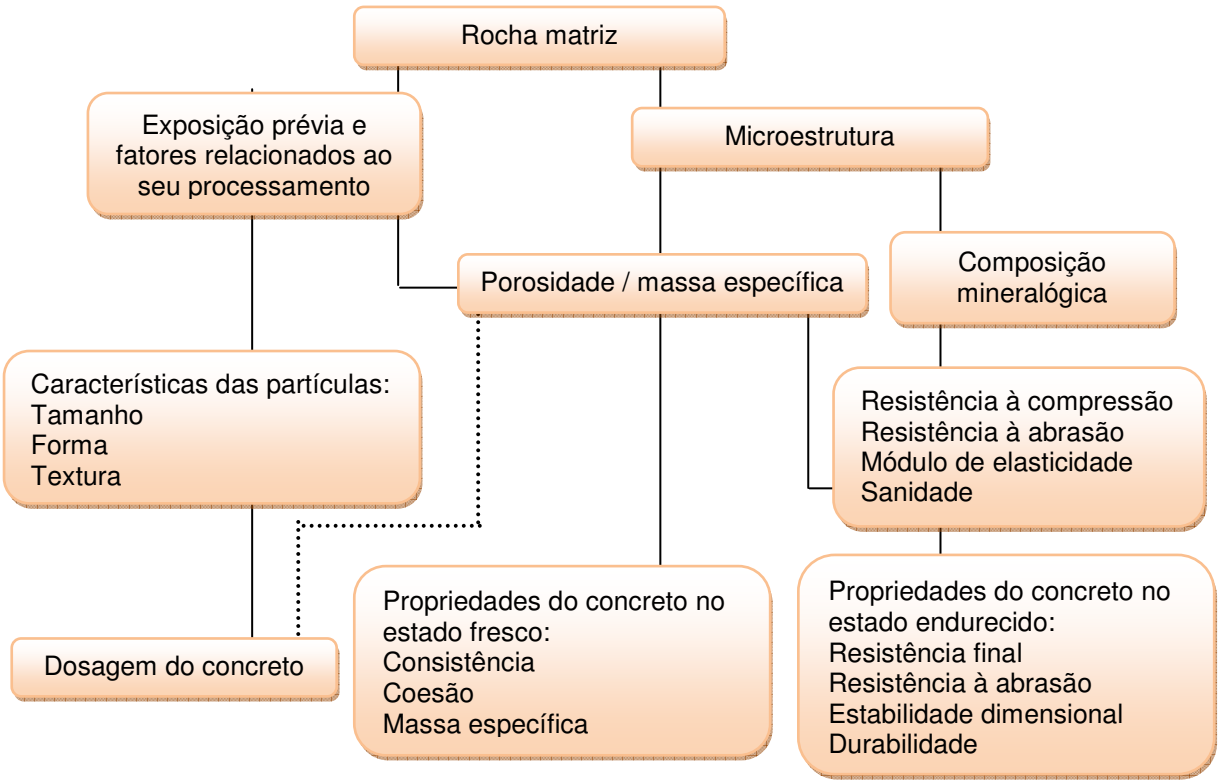


Figura 5.8 – Diagrama da interrelação microestrutura, condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado
Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.274.

MEHTA e MONTEIRO (2008) ressaltam que as propriedades do agregado não afetam apenas as características de dosagem do concreto, mas também o comportamento do concreto nos estados fresco e endurecido. Assim, devido a essa sobreposição, devem ser consideradas três categorias das propriedades do agregado com base nos fatores microestruturais e fatores relacionados ao seu processamento:

–Características dependentes da porosidade – massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade;

–Características dependentes das condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação – tamanho, forma e textura das partículas;

–Características dependentes da composição mineralógica – resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

5.1.1. Porosidade – massa específica e massa unitária

A massa específica do agregado, especialmente a do agregado graúdo, é a grande responsável pela massa específica do concreto, parâmetro importante na determinação do peso das respectivas estruturas e, consequentemente no cálculo estrutural das mesmas. Guarda também uma relação proporcional com a resistência à compressão do concreto, uma vez que o peso e porosidade do agregado são características inversamente proporcionais. Em geral, mas não necessariamente, agregados mais leves são mais porosos, apresentando maior índice de vazios e por consequência menor resistência, podendo assim constituir o elemento mais frágil na mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para fins de dosagem de concreto, não é necessário determinar a massa específica real de um agregado, uma vez que os agregados naturais são porosos e os valores de até 2% são comuns para rochas ígneas intrusivas, de até 5% para rochas sedimentares compactas e de 10 a 40% para arenitos e calcários muito porosos. Para efeitos de dosagem, o importante se torna conhecer o espaço ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas. Portanto, é suficiente determinar a massa específica, que é definida como a massa do material, incluindo os poros internos, por unidade de volume. Para muitas rochas comumente utilizadas, a massa específica varia entre 2.600 e 2.700g/m^3. Os valores típicos para granito, arenito e calcário denso são 2.690, 2.650 e 2.600kg/m^3, respectivamente, (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Para a definição das dosagens de concreto, além da massa específica, são necessários dados sobre a massa unitária, definida como a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade do volume. O fenômeno da massa unitária surge porque não é possível empacotar as partículas do agregado juntas e forma a não deixar espaços vazios entre elas. Desta forma, o termo massa unitária é utilizado quando o volume é ocupado tanto pelos agregados quanto pelos vazios, A massa unitária aproximada dos agregados comumente usados para o concreto de peso normal varia de 1.300 a 1.750kg/m^3 (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

5.1.2. Porosidade – absorção e umidade superficial

A absorção de um material é considerada como a quantidade de água necessária para tirar o material da condição de *seco* para a de *saturado de superfície seca*. A água excedente à condição de *saturado de superfície seca* é a umidade superficial, parâmetro correntemente expresso em percentual do peso seco.

A Figura 5.9 mostra as várias condições de umidade que podem existir em uma partícula de agregado.

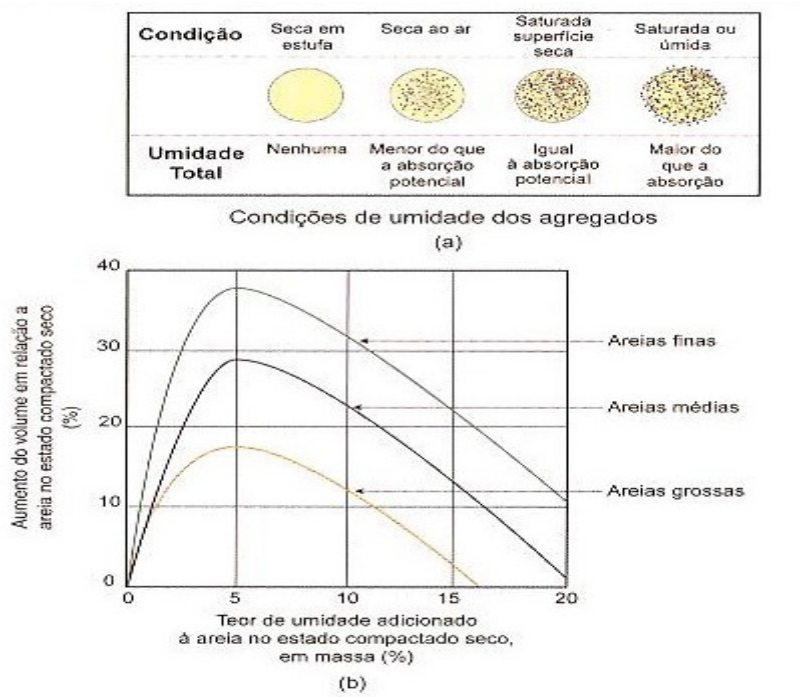


Figura 5.9 – (a) Agregado em várias condições de umidade; (b) inchamento devido à umidade no agregado miúdo
Fonte: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1988, p.36; MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.276.

Analisando-se a Figura 5.9 (a), tem-se que quando todos os poros permeáveis estão saturados e não existe uma película de água ou filme de água em sua superfície, diz-se que o agregado está na condição 'saturada superfície seca' (SSS). Quando o agregado está saturado e também há umidade livre na superfície, o agregado está na 'condição úmida ou saturada'. Na condição 'seca em estufa', toda a água evaporável foi eliminada por aquecimento a 100ºC. A capacidade de absorção é definida como a quantidade total de água necessária para levar um agregado da condição seca em estufa à condição SSS. A 'absorção efetiva' é definida como a quantidade de água

necessária para levar o agregado da condição seca ao ar à SSS. A quantidade de água que vai além da necessária para a condição SSS é denominada ‘umidade superficial’. Os dados relativos à capacidade de absorção, absorção efetiva e umidade superficial são sempre necessários para corrigir as proporções de água e de agregado em misturas de concreto produzidas com materiais estocados. Assim, a capacidade de absorção de um agregado, facilmente determinada, pode ser usada como medida aproximada de sua porosidade e resistência.

Na maior parte das vezes, os valores de correção de umidade para rochas ígneas intrusivas e para rochas sedimentares compactas são muito baixos, mas altos nos casos de rochas sedimentares porosas, agregados leves e areias saturadas. As areias podem sofrer um fenômeno conhecido como ‘inchamento’. Dependendo do teor de umidade e da composição granulométrica do agregado, pode ocorrer um aumento significativo do volume aparente da areia (Figura 5.9 (b). As areias finas apresentam maior inchamento porque a tensão superficial da água mantém as partículas separadas, além de se saber que como a maioria das areias entregues em canteiros de obras está saturada, podem ocorrer grandes variações nas dosagens se forem feitas em volume (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

5.1.3. Porosidade – resistência à compressão, resistência à abrasão e módulo de elasticidade

A resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade do agregado são propriedades interrelacionadas, muito influenciadas pela porosidade. Geralmente os agregados de origem natural utilizados para a produção de concreto de densidade normal são densos e resistentes e, então, raramente constituem fator limitante de resistência e das propriedades elásticas do concreto. Valores típicos de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico para a maioria dos agregados de granito, basalto, rochas plutônicas, *flint*, arenito quartzítico e calcários densos variam de 210 a 310MPa e de 70 a 90GPa, respectivamente (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

5.1.4. Porosidade – sanidade

A sanidade de um agregado é medida pela sua resistência à desintegração ou desgaste das partículas quando submetidas a ciclos de molhagem e secagem

consecutivos em solução de sulfatos de sódio ou magnésio. Outro aspecto importante a ser considerado em um agregado é o tocante à possibilidade de eventuais reações álcali-agregado (reatividade do agregado com os hidróxidos alcalinos presentes no cimento hidratado - NaOH e KOH), as quais tendem a desagregar completamente o concreto em virtude de expansões generalizadas que podem ocorrer no seu interior.

Um agregado é considerado instável quando variações volumétricas no agregado por intemperismo (ciclos alternados de molhagem e secagem, ou de congelamento e degelo, por exemplo) resultam na deterioração do concreto. A instabilidade normalmente surge com rochas que possuem específica estrutura de poros. Os concretos que contêm *cherts*, folhelhos, calcários e arenitos têm se apresentado suscetíveis aos danos pela ação de congelamento ou por cristalização de sais dentro da partícula do agregado. A instabilidade, portanto, está relacionada à distribuição do tamanho dos poros, e não à porosidade total do agregado. Uma distribuição de tamanho dos poros que permita que as partículas do agregado fiquem saturadas na molhagem (ou no degelo), mas impede a drenagem fácil durante a secagem (ou no congelamento), é capaz de causar alta pressão hidráulica dentro das partículas do agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A sanidade ou estabilidade do agregado frente à ação do intemperismo é determinada pela norma da ASTM C 88 (2013), que descreve um procedimento padronizado para a determinação direta da resistência do agregado à desintegração quando exposto a cinco ciclos de molhagem-secagem. Para o ciclo de molhagem, utiliza-se uma solução saturada de sulfato de sódio ou magnésio.

5.1.5. Exposição e fabricação – dimensão máxima e composição granulométrica

Nos Estados Unidos, a ‘dimensão máxima característica do agregado’ é designada pela dimensão da abertura da peneira na qual ficam retidas 15% ou mais de partículas. No Brasil (ABNT NBR 7211, 2005), a dimensão máxima característica do agregado é definida como sendo a grandeza associada à abertura nominal da peneira, em mm, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%, em massa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Composição granulométrica é

> [...] a distribuição de dimensão das partículas de um material granular entre várias faixas granulométricas, normalmente expressa em termos de porcentagem acumulada maior ou menor do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou da porcentagem entre certa faixa de abertura das peneiras (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.278).

As Tabelas 5.4 e 5.5 mostram os requisitos de composição granulométrica para agregados miúdos e graúdos, respectivamente, segundo a ASTM C 33 (2013).

Tabela 5.4 – Exigências granulométricas para agregados miúdos

Peneira (Especificação E 11)	Porcentagem passante
9,5mm	100
4,75mm (nº 4)	90-100
2,36mm (nº 8)	80-100
1,18mm (nº 16)	50-85
600mm (nº 30)	25-60
300mm (nº 50)	10-30
150mm (nº 100)	2-10

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2008, p.281.

Tabela 5.5 – Exigências granulométricas para agregados graúdos

Nº da peneira	Dimensão nominal (peneira com abertura de malha quadrada)	Porcentagem passante na peneira de malha quadrada (em massa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm
1	90-37,5mm	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63-37,5mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50-25,0mm	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-
357	50-4,75mm	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5	-	-
4	37,5-19,0mm	-	-	-	-	100	90-100	20-25	0-15	-	0-5	-	-	-
467	37,5-4,75mm	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-
5	25,0-12,5mm	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-
56	25,0-9,5mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-
57	25,0-4,75mm	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-
6	19,0-9,5mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-25	0-15	0-5	-	-
67	19,0-4,75mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-
7	12,5-4,75mm	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
8	9,5-2,36mm	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.280.

O motivo mais importante para especificar os limites granulométricos e a dimensão máxima do agregado é sua influência sobre a trabalhidade e o custo. Como exemplo, podem ser citadas as areias muito grossas, que produzem misturas de concreto ásperas e não trabalháveis, e areias muito finas, que aumentam a demanda de água (e também o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento), não sendo econômicas.

5.1.6 Exposição e fabricação – forma e textura superficial

A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que no endurecido. A forma é avaliada visualmente e a textura é verificada conforme a norma ABNT 7809 (2008).

A forma diz respeito às características geométricas tais como: arredondada, angulosa, alongada ou achatada. Partículas formadas por atrito tendem a ser arredondadas, pela perda de vértices e arestas. Areias de depósitos eólicos, assim como areia e pedregulho de zonas marítimas ou leitos de rio, têm geralmente uma forma bem arredondada. Agregados de rochas intrusivas britadas possuem vértices e arestas bem definidos e são chamados de angulosos. Geralmente, produzem partículas equidimensionais. Calcários estratificados, arenitos e folhelho tendem a produzir fragmentos alongados e achatados, especialmente quando são usados britadores de mandíbula no beneficiamento. Aquelas partículas cuja espessura é relativamente pequena em relação às outras duas dimensões, são chamadas de lamelares ou achatadas, enquanto aquelas cujo comprimento é consideravelmente maior do que as outras duas dimensões são chamadas de alongados. Algumas vezes, outro termo usado para descrever a forma de agregados graúdos é a *área específica volumétrica*, definida como a relação entre a área superficial e o volume. Partículas esféricas ou bem arredondadas têm baixo valor de área específica, mas partículas alongadas e achatadas possuem valor elevado de área específica (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os agregados de forma lamelar são difíceis de serem misturados e manuseados, exigindo uma quantidade de argamassa maior. Um excesso de areia favorece a formação de bolhas, enquanto que um concreto com pouca argamassa pode ter uma superfície isenta de bolhas. O adensamento do concreto que contém agregados lamelares é mais difícil podendo, inclusive, gerar ninhos de concretagem além de ter

uma tendência a diminuir a aderência da pasta de cimento com o agregado, aumentando a permeabilidade do concreto (SILVA, 1995).

O arredondamento representa a agudeza ou angulosidade das arestas ou cantos de uma partícula. O arredondamento depende muito da resistência à abrasão da rocha mãe e das ações de desgaste a que a partícula foi submetida. No caso de agregado britado, a forma da partícula depende da natureza do mineral de origem, do tipo de britador e da sua relação de redução, isto é, da relação entre os tamanhos de material que entra e do material que sai do britador. Uma classificação prática e abrangente de arredondamento é a da BS 812, parte 1 (1975, citada por NEVILLE (1997) (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Classificação da forma de partículas de agregados

CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS
Arredondado	Completamente erodido pela água ou por atrito	Seixo de rio ou de praia, areia do rio ou de deserto
Irregular	Naturalmente irregular ou parcialmente desgastado por atrito, com cantos arredondados	Outros seixos Opalas
Lamelar	Espessura é pequena em relação às outras dimensões	Rochas laminadas
Anguloso	Possui arestas bem definidas, formadas pela interseção de faces relativamente planas	Pedras britadas em geral
Alongado	Geralmente anguloso, em que o comprimento é bem maior que as demais dimensões	
Discoide	Comprimento muito maior do que a largura e a largura muito maior que a espessura	

Fonte: BS 812, 1975; NEVILLE, 1997.

Quanto maior o tamanho do agregado no concreto e mais elevada a proporção de partículas chatas e alongadas, maior será a tendência do filme de água se acumular próximo à superfície do agregado (exsudação), enfraquecendo a zona de transição pasta-agregado. Quando comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas angulosas e alongadas de textura áspera requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto (NEVILLE, 1997).

A textura superficial do agregado depende da dureza, tamanho do grão, porosidade da rocha matriz e sua subsequente exposição a forças de atrito. Obsidiana, *flint* e *chert* são lisos em seu estado natural. Rochas britadas como granito, basalto e calcário

apresentam textura áspera. Pedras-pomes, escória expandida e cinza volante sinterizada apresentam uma textura celular com poros visíveis (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Tem sido constatado que, nas primeiras idades, a resistência do concreto à flexão pode ser afetada pela textura do agregado. Uma textura mais áspera parece favorecer a formação de uma forte aderência mecânica pasta/agregado. Em idades mais avançadas, com o desenvolvimento de forte aderência química pasta/agregado, esse efeito pode não ser tão importante (MAIA, 2008).

O aumento de aderência devido à textura áspera está relacionado com o efeito das forças de natureza físico-química e com o efeito de intertravamento mecânico entre agregado e pasta de cimento. Para o concreto fresco, a textura áspera vai exigir mais água, reduzindo um pouco esta vantagem (SILVA, 1995).

5.1.7 Composição mineralógica – resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias

A composição mineralógica dos agregados (principais minerais presentes, minerais secundários, demais ocorrentes e seus respectivos percentuais), entre outras especificidades, é obtida por análise química, difratometria de raios-X e caracterização petrográfica, que corresponde ao estudo descritivo e sistemático da rocha origem do agregado (SANTOS, BRANDÃO; SAMPAIO, 2005; PORPHÍRIO; BARBOSA; BERTOLINO, 2010).

A composição mineralógica dos agregados é de vital importância para inferir e prever sobre seu comportamento nos concretos, já que algumas contaminações ou ocorrências podem estabelecer reações com os cimentos (reações álcalis-agregado). Nesse tipo podem ser destacados aspectos como o estado de alteração dos minerais, que influencia não apenas sua durabilidade (ensaios químicos), mas também seu comportamento quando sujeito a solicitações físicas (SANTOS; BRANDÃO, 2003).

A porosidade e a composição mineralógica respondem de forma determinante pela sua resistência à compressão, sua dureza, integridade e seu módulo de elasticidade, características que têm íntima relação com o desempenho do concreto endurecido quando submetido aos respectivos ensaios físicos. Em geral, rochas mais densas e

compactas são mais duras, têm maior resistência à compressão e apresentam módulos de elasticidade mais elevados (NEVILLE, 1997).

Dependendo de sua formação, as rochas que constituem os agregados naturais podem ser de três tipos de origem: rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas. As rochas ígneas são as formadas pela consolidação de material proveniente de fusão. São duras e compactas, homogêneas e isótropas (ex: basaltos e granitos). As rochas sedimentares são as formadas pela consolidação do material transportado e depositado pelo vento e pela água; são dispostas em camadas estratificadas, sedimentos; não isótropas (ex: calcários). As rochas metamórficas são as formadas pela alteração gradual das anteriores, em sua composição e estrutura pela ação do calor, pressão e água (ex: gnaisse formado a partir da alteração de granitos, mármores formados pela alteração de calcários e quartzito decorrente da alteração dos arenitos).

Substâncias deletérias são aquelas que, por sua própria definição, corrompem, são danosas, destroem as propriedades desejáveis das argamassas e concretos, alterando de forma comprometedora, por exemplo, sua trabalhabilidade, sua pega, o desenvolvimento de sua cristalização interna e comprometendo seu endurecimento. Por conseguinte, interfere no crescimento de suas resistências e durabilidade. As impurezas orgânicas, os torrões de argila e os materiais pulverulentos constituem essas substâncias, além dos indesejáveis cloretos, quando em ocorrência superior aos limites de Norma. Substâncias deletérias aparecem como componentes minoritários tanto no agregado miúdo quanto no agregado graúdo (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Limites para as substâncias deletérias em agregados para concreto

Substância	Possíveis efeitos deletérios sobre o concreto	Teor máximo permitido (% em massa)	
		Agregado miúdo	Agregado graúdo*
Material passante na peneira de abertura 75mm (Nº 200)	Afeta a trabalhidade; aumenta a demanda de água		
Concreto sujeito à abrasão Todos os outros concretos		3** 5**	1
Torrões de argila e partículas friáveis	Afetam a trabalhidade e a resistência à abrasão	3	5
Carvão mineral e lignito	Afetam a durabilidade; causam manchas		
Concreto aparente Todos os outros concretos		0,5 1	0,5
Chert (massa específica menor do que 2400 kg/m^3)	Afeta a durabilidade	-	5

Notas:
(*) Os limites da ASTM C 33 para substâncias deletérias no agregado graúdo variam de acordo com as condições de exposição e o tipo de estruturado concreto. Os valores apresentados aqui são para estruturas externas, expostas a condições climáticas moderadas.
(**) No caso de areia artificial, se o material pulverulento (menor do que 75 mm) for de pós de faturamento de rocha, essencialmente livre de argila ou de folhelho, esses limites podem ser aumentados para 5% e 7%, respectivamente.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.284.

Além dos materiais listados na Tabela 5.7, há outras substâncias que podem ter efeitos deletérios envolvendo reações químicas no concreto. Tanto para agregados miúdos quanto para graúdos, a ASTM C 33 (2002) exige que 'agregados para uso em concretos que serão sujeitos à molhagem, à exposição prolongada a atmosfera úmida, ou em contato com solo úmido, não devem conter quaisquer materiais potencialmente reativos com os álcalis do cimento em uma quantidade suficiente para causar expansão excessiva. A não ser que tais materiais estejam presentes em quantidades danosas, o agregado pode ser utilizado com cimentos que contenham menos de 0,6% de álcalis ou com a adição de um material que tenha mostrado evitar a expansão deletéria resultante da reação álcali-agregado'.

5.2. Microestrutura da pasta de cimento hidratada

Sabe-se que grande parte do desenvolvimento de materiais estruturais partiu do conhecimento de que as propriedades de um sólido são derivadas de sua microestrutura. Conforme MEHTA (1986), a caracterização e o controle da microestrutura da pasta de cimento fornecem embasamento para o desenvolvimento de materiais (argamassa e concretos) com características possíveis ou desejáveis.

Dito de outra forma, a microestrutura da pasta de cimento é modificada na vizinhança das partículas do agregado. Alguns termos são utilizados para se referir a essa região, mas usualmente ela é considerada como ITZ (interface na zona de transição) (*Interfacial Transition Zone*), e muitas propriedades do concreto devem ser analisadas considerando-o um composto de três fases: agregado, ITZ e matriz (OLLIVIER; MASO; BOURDETTE, 1995).

O conhecimento e o estudo da microestrutura de um material tornou-se acessível a partir do avanço tecnológico da eletrônica, em especial o verificado nos microscópios eletrônicos, em que o aumento possível de observação dos mais modernos é da ordem de 10^5 vezes. Assim, a aplicação de técnicas de microscopia eletrônica de varredura, a de alta resolução e ainda a de transmissão permitem analisar a microestrutura de materiais em frações de 1 micrometro.

Segundo METHA e MONTEIRO (2008), a partir da investigação de uma seção transversal de um concreto, duas fases podem ser facilmente distinguidas, a das partículas dos agregados, de tamanhos variados, e a do meio ligante, formada pela massa da pasta de cimento hidratada, o que levaria a considerar tratar-se de material bifásico (Figura 5.10).

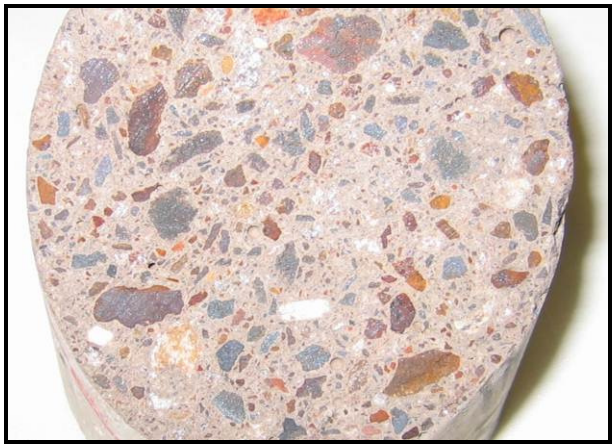


Figura 5.10 – Detalhe da seção de um corpo de prova produzido com rejeito de *sinter feed* – *aparência bifásica*
Fonte: O autor, 2009.

Entretanto, em nível microscópico, verifica-se tratar de estrutura de extrema complexidade. A Figura 5.11 ilustra a interface agregado/matriz cimentícia em imagem de elétrons secundários, numa ampliação de 500 vezes.

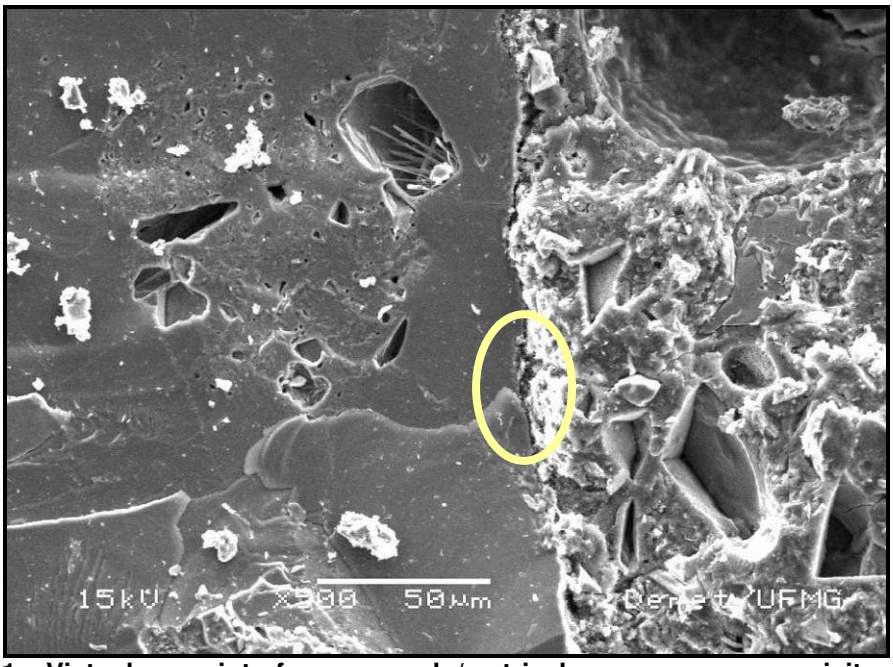


Figura 5.11 – Vista de uma interface agregado/matriz da argamassa com rejeito: 500x
Fonte: O autor, 2009.

A Figura 5.12 amplia a área circulada em amarelo em 3.000 vezes, propiciando verificar a existência não apenas de uma interface, mas a de uma zona de transição com características próprias, como se referenciará adiante.

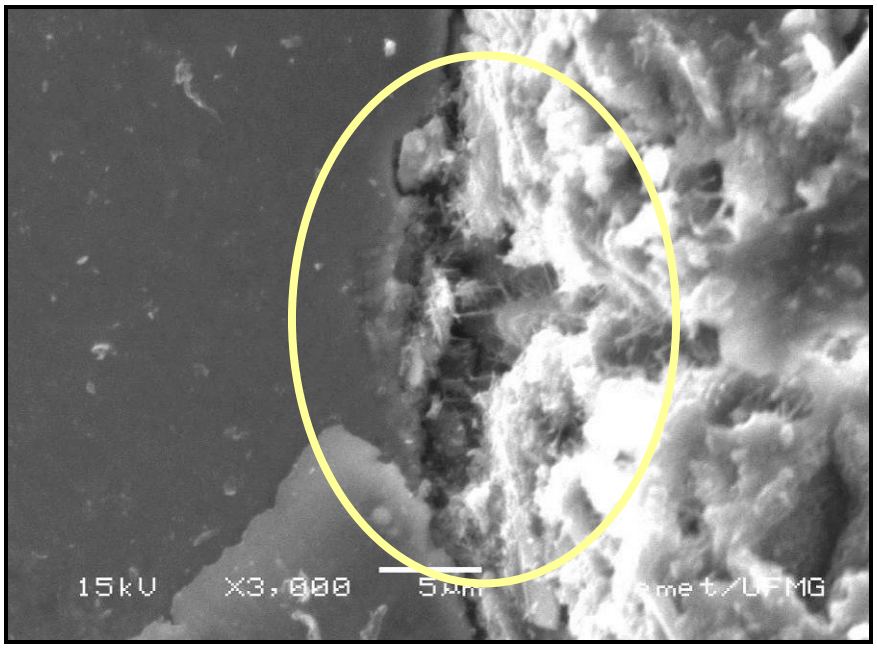


Figura 5.12 – Visão ampliada da área destacada da imagem anterior: 3000x
Fonte: O autor, 2009.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), não há distribuição homogênea entre as duas fases distinguidas macroscopicamente, tampouco elas mesmas são homogêneas entre si. Especificamente em relação à pasta de cimento hidratado, estudos microestruturais do compósito têm mostrado que, na presença do agregado, a microestrutura dessa pasta na vizinhança de grandes partículas do agregado é, geralmente, bastante diferente da microestrutura da matriz da pasta ou argamassa no sistema agregado / zona de transição / argamassa. Em decorrência, muitos aspectos do comportamento do concreto sob tensão podem ser explicados apenas quando a interface pasta de cimento-agregado é tratada como uma terceira fase da mistura do concreto ou argamassa.

SCRIVENER e PRATT (1994) informam que, durante a mistura, o arranjo espacial dos grãos anídricos se torna mais solto na vizinhança das partículas do agregado. Por consequência, no concreto fresco a porosidade e a taxa água/cimento aumentam a partir da massa até à superfície das partículas do agregado. Além disso, durante a vibração do concreto e seu lançamento, é criada acumulação de água debaixo das partículas do agregado. Devido ao primeiro efeito, a pasta de cimento fresco que circunda os grãos do agregado exibe um gradiente de água e um gradiente complementar de cimento anídrico. Em virtude do segundo efeito, pode ser observada certa heterogeneidade do gradiente ao redor das partículas.

De acordo com MINDES *et al.* (2002), a ITZ tem uma espessura usual que pode variar de 20 a 40μm, dependendo de uma série de fatores, como o tipo e forma do agregado, sua granulometria, o fator água/cimento, mistura e procedimentos de produção, dentre outros, não sendo também regular para uma mesma condição do agregado.

A matriz da pasta de cimento hidratada e a zona de transição na interface matriz-agregado geralmente apresentam uma distribuição heterogênea de diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras.

MEHTA e MONTEIRO (2008) observam ainda que, diferentemente de outros materiais de engenharia, a microestrutura do concreto não é uma característica intrínseca do material, uma vez que os dois constituintes de sua microestrutura, a pasta de cimento hidratada e zona de transição na interface, estão sujeitos a alterações com o tempo, a umidade e a temperatura ambiente. Assim, o adequado conhecimento das características e do comportamento da microestrutura de cada uma das três fases do

concreto é essencial para se entender e controlar as propriedades e desempenho desse material compósito.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) 'fase agregado' é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto, propriedades influenciadas pela densidade e pela resistência do agregado, fatores que dependem muito mais de suas características físicas do que das químicas. A porosidade, a forma do agregado e sua textura superficial determinam, em grande parte, várias das propriedades físicas do concreto. Contudo, embora sendo a fase mais resistente presente no compósito, a 'fase agregado' não influencia diretamente a resistência de um concreto normal a não ser em condições especialíssimas, quando constituído por agregados de forma muito lamelar, muito porosos ou frágeis.

Os compostos potenciais do cimento Portland, que constitui um dos materiais envolvidos na presente pesquisa, são o C_3S (silicato tricálcico), o C_2S (silicato bicálcico), o C_3A (aluminato tricálcico) e o C_4AF (ferroaluminato tetracálcico). A partir da adição de água à mistura cimento/agregados inicia-se o processo de hidratação do cimento, altamente reativo, gerando uma gama de compostos hidratados estáveis, num processo de intensa cristalização. No período inicial ocorre a hidratação dos silicatos e aluminatos tricálcicos, C_3A e C_3S (idades iniciais de 3 a 7 dias), responsáveis pelas primeiras resistências do concreto. Nesta fase, a etringita ($C_6AS_3H_{32}$), também com a notação C-A-S-H, cristaliza-se a partir da hidratação dos aluminatos. Paulatinamente é transformada em monossulfato. Também o hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, ou comumente chamado Portlandita, cristaliza-se a partir da hidratação dos silicatos.

Até os 7 dias ocorre o aumento da hidratação do C_3S; até os 28 dias continua a hidratação do C_3S, responsável pelo aumento da resistência, com pequena contribuição do C_2S e, acima de 28 dias, o aumento da resistência é devido à hidratação do C_2S (BASÍLIO, 1981).

Os silicatos de cálcio hidratados, com a notação genérica de C-S-H, são os responsáveis pelas resistências mecânicas do concreto, que se estabelece pela intensa interação de seus cristais com as superfícies dos agregados, devido a existência das forças de atração de van der Waals. Os hidróxidos de cálcio, com notação genérica de CH, são compostos solúveis, com muito pouca e baixa

contribuição para a resistência do concreto e quando presente a ocorrência de lixiviação são responsáveis pela carbonatação do concreto.

No que tange à hidratação do cimento, MINDES *et al*. (2002) destacam o fenômeno chamado de 'efeito parede' (*wall effect*), duas situações relacionadas à maior porosidade e à ocorrência de cimento que não tenha reagido nas proximidades da superfície da partícula. Ambas se devem à incapacidade das partículas de cimento para embalar de forma eficiente toda a partícula. Isto aumenta a relação a/c nos locais de interface, criando uma película de água em torno das partículas maiores do agregado.

Na situação onde coexiste porosidade na superfície do agregado juntamente com a porosidade da pasta na interface matriz/agregado é que até mesmo recomendações de mistura e processamento do concreto, priorizando aspectos ligados à tensão superficial da água e à viscosidade da calda água/cimento, poderão assumir caráter de singular importância no estudo dessa zona de transição e da ligação pasta/agregado.

Corroborando com esse pressuposto, ao abordar aspectos ligados à porosidade e à absorção do inerte, COUTINHO (1988) observa que quando se emprega o inerte seco, o comportamento da argamassa, sob o ponto de vista da trabalhabilidade da amassadura, é também afetado pela ordem de alimentação dos componentes na betoneira.

Conforme MEHTA e MONTEIRO (2008), alguns questionamentos relacionados ao comportamento do concreto encontram-se na zona de transição na interface existente entre partículas grandes do agregado e a pasta de cimento hidratada, como, por exemplo:

(1) O concreto é frágil na tração e relativamente dúctil na compressão?
(2) Os componentes do concreto, quando ensaiados separadamente sob compressão uniaxial, permanecem elásticos até a ruptura, enquanto o concreto apresenta um comportamento inelástico?
(3) A resistência à compressão de um concreto é de uma ordem de grandeza maior do que sua resistência à tração?
(4) Para um determinado consumo de cimento, relação água/cimento e idade de hidratação, a argamassa de cimento será sempre mais resistente do que

concreto correspondente? E a resistência do concreto cairá com o aumento da dimensão do agregado graúdo?

(5) A permeabilidade de um concreto, mesmo contendo um agregado muito denso, será maior em uma ordem de grandeza do que a pasta de cimento correspondente?

Devido às dificuldades experimentais, as informações são restritas, mas MASO (1980), ainda na década de 80, esclareceu características microestruturais que podem ser obtidas a partir da sequência do desenvolvimento do concreto a partir de seu lançamento. Informa que, inicialmente, no concreto recém-compactado, formam-se filmes de água em torno das grandes partículas de agregado, o que contribuiria para maior relação água/cimento na região próxima ao maior agregado do que longe dele, ou seja, na matriz da argamassa. Em seguida, íons de cálcio, sulfato, hidroxila e aluminato produzidos pela dissolução dos compostos sulfato de cálcio e aluminato de cálcio se combinam para formar etringita e hidróxido de cálcio. Em virtude da elevada relação água/cimento, nas proximidades do agregado graúdo esses produtos cristalinos apresentam cristais relativamente maiores e formam uma estrutura mais porosa do que na matriz da pasta de cimento ou da argamassa. Com o desenvolvimento da hidratação, o C-S-H pouco cristalino e uma segunda geração de cristais menores de etringita e hidróxido de cálcio começam a preencher o espaço vazio existente entre a estrutura criada pelos grandes cristais de etringita e de hidróxido de cálcio, o que ajuda a melhorar a densidade e, por consequência, a resistência da zona de transição na interface, ITZ (*Interfacial Transition Zone*), conforme Figura 5.13.

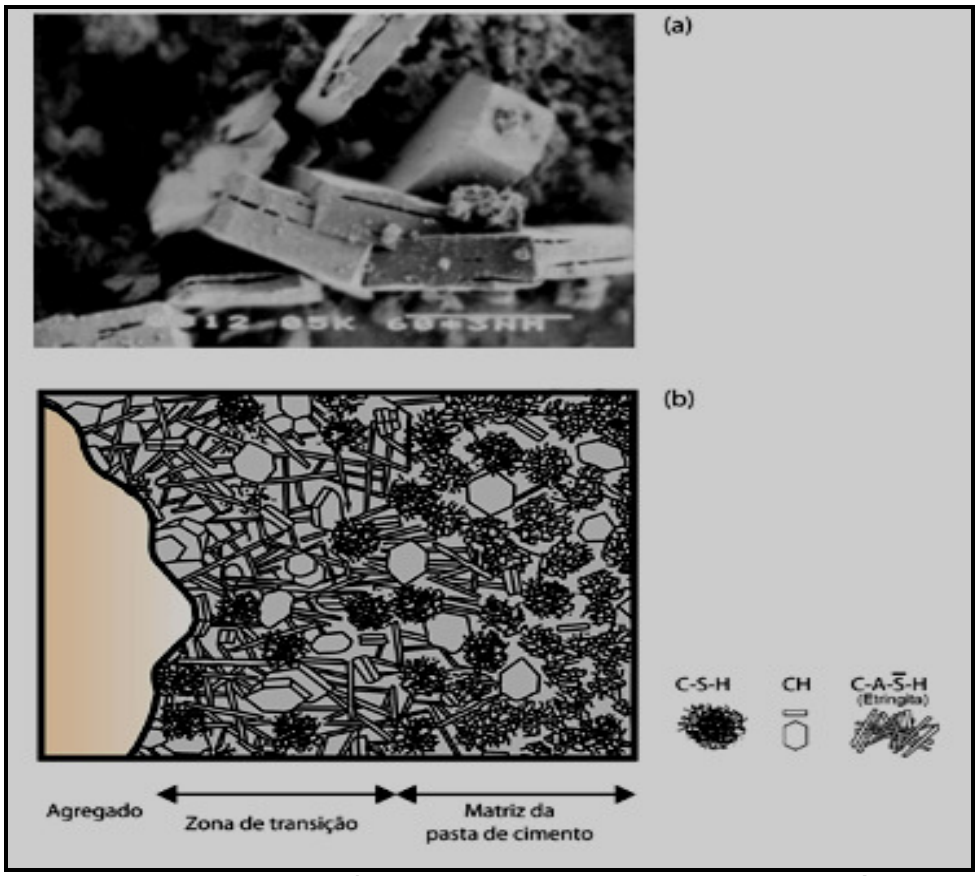


Figura 5.13 – (a) Micrografia eletrônica de varredura dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição; (b) Representação diagramática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto
Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.43.

Com relação à Figura 5.13, MEHTA e MONTEIRO (2008) esclarecem que nas primeiras idades, especialmente quando ocorreu considerável exsudação interna, o volume e tamanho dos vazios na zona de transição são maiores do que na matriz pasta de cimento ou argamassa. O tamanho e a concentração de compostos cristalinos, como o hidróxido de cálcio e a etringita, também são maiores nessa zona de transição. As fissuras são formadas facilmente na direção perpendicular ao eixo c. Tais efeitos contribuem para uma menor resistência na zona de transição quando comparada com a matriz da pasta de cimento no concreto.

As forças de atração de van der Waals são as responsáveis pela aderência entre os produtos de hidratação e as partículas de agregado. Assim, a resistência da zona de transição na interface em qualquer região depende do volume e tamanho dos vazios existentes. Mesmo para baixa relação água/cimento nas primeiras idades, o volume e o tamanho dos vazios na zona de transição serão maiores do que na matriz de

argamassa; por consequência, a zona de transição possui menor resistência. Com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode se tornar igual à resistência da matriz de argamassa como resultado da cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição na interface pelas lentas reações químicas entre os constituintes da pasta de cimento e o agregado, formando silicatos de cálcio hidratados (no caso de agregados silicosos) ou formando carboaluminatos hidratados (no caso de calcário). Essas interações contribuem para a resistência, porque também tendem a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ainda segundo os autores supracitados, grandes cristais de hidróxido de cálcio possuem menor capacidade de aderência, não apenas em função de sua baixa área superficial e forças de atração van der Waals correspondentes mais fracas, mas também porque eles possuem planos de clivagem preferenciais devido à sua tendência de formar uma estrutura orientada.

Além do grande volume de vazios capilares e cristais de hidróxido de cálcio orientados, as microfissuras representam um fator importante responsável pela baixa resistência da zona de transição na interface do concreto. A quantidade das microfissuras depende de muitos fatores, que incluem

> [...] o tamanho do agregado e a sua distribuição granulométrica, consumo de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto no estado fresco, condições de cura, umidade ambiente histórico térmico do concreto. (...) Em outras palavras, um concreto pode sofrer microfissuras na zona de transição mesmo antes de a estrutura ser carregada (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.44).

Para PING, BEAUDOIN e BROUSSEAU (1991), não existe relação entre o efeito quantitativo do tamanho do agregado na microestrutura da zona de transição na interface.

Concluindo estudo sobre a ITZ no concreto, OLLIVIER, MASO e BOURDETTE (1995) afirmam que se ocorre ou não a floculação, o arranjo geométrico dos grãos de cimento na água sofre interferência no concreto pela presença dos agregados. Isto envolve um efeito de parede que cria um gradiente para a concentração de água na pasta de cimento e, portanto, no gradiente da taxa água/cimento. No estado inicial, o último é infinito no contato com os agregados e tende para um limite mais baixo do que seu

valor teórico calculado a partir das quantidades de água/cimento introduzidas no concreto. Essa interferência, que é mais significativa em uma espessura de 15 a 20μm ao redor dos agregados e é equivalente ao diâmetro médio dos grãos de cimento, gera um número de consequências citadas a seguir sobre a microestrutura da pasta de cimento hidratado na vizinhança dos agregados:

(1) a dimensão relativamente ampla dos espaços vazios pela formação dos hidratos iniciais, juntamente com as variações significativas da mobilidade de íons resultantes dos compostos anídricos, leva, durante a hidratação, a cristalização preferencial de hidratos que correspondem a mais íons móveis, etringita e portlandita, de acordo com o processo de hidratação de Le Chatelier;

(2) uma relativamente maior taxa local água/cimento com poucos sítios de nucleação resulta em um mínimo de germes e na formação de cristais maiores, mais bem formados e orientados preferencialmente em contato com agregados; e (3) como os poros a serem preenchidos são largos, a porosidade em todas as idades vai permanecer mais alta (OLLIVIER; MASO; BOURDETTE, 1995).

Em estudo realizado na década de 2000 sobre a influência do tamanho do agregado, taxa água/cimento e idade na microestrutura da zona de transição na interface do concreto, ELSHARIEF, COHEN e OLEK (2003) concluíram, dentre outros aspectos, que:
(1) considerando a mesma idade e a dosagem água/cimento, a redução do tamanho do agregado de 2.36-4.75μm para 150-300μm tende a reduzir a porosidade e aumentar o conteúdo das partículas não hidratadas na região ao redor do agregado,
(2) a evolução da microestrutura da zona de transição na interface (ITZ) do concreto depende da microestrutura inicial. Para água/cimento 0.55, entre 7 e 180 dias, a ITZ parece desenvolver maior microestrutura relativamente àquela da massa, o que talvez se deva à deficiência do conteúdo das partículas não hidratadas na ITZ, quando comparada à massa em uma idade mais nova. Para água/cimento 0.4, entre 7 e 180 dias, a ITZ 150-300 μm circundante do agregado parece desenvolver microestrutura mais densa relativamente àquela da massa, o que pode ser atribuído à presença relativamente alta do conteúdo das partículas não hidratadas na ITZ em idade mais baixa, o que eventualmente preenche os poros com os produtos de hidratação em idade mais avançada, e

(3) o efeito do tamanho do agregado na espessura da ITZ não parece ter padrão específico e parece depender do método de avaliação da espessura da ITZ (ELSHARIEF; COHEN; OLEK, 2003).

Conforme MEHTA e MONTEIRO (2008), a microestrutura da ITZ, especialmente o volume de vazios e microfissuras presentes, exerce grande influência na rigidez ou no módulo de elasticidade do concreto. No material compósito, a zona de transição serve como uma ponte entre dois componentes: a matriz de argamassa e as partículas do agregado graúdo. Mesmo quando os componentes individuais possuem alta rigidez, a rigidez do compósito é reduzida em função das zonas fragilizadas (vazios e microfissuras na ITZ), que não permitem transferência de tensão. Além disso, dependendo das características do agregado (como dimensão máxima e granulometria), é possível existirem grandes diferenças na relação água/cimento entre a matriz argamassa e a ITZ. Em geral, mantendo-se os demais fatores constantes, quanto maior o tamanho do agregado, mais alta será a relação água/cimento localizada na ITZ e, consequentemente, menos resistente e mais permeável será o concreto.

5.3. Interações da pasta de cimento hidratada

O mecanismo de hidratação do cimento é um fenômeno bastante conhecido, amplamente estudado e não faltam trabalhos nas mais diversas especificidades e focos, o que constitui um amplo e rico acervo tecnológico e de pesquisas à disposição do meio interessado. Pertinente, entretanto, destacar que no caso de concretos com elevados teores de adições minerais ainda são necessários estudos mais aprofundados.

Esse mecanismo é constituído por um processo de dissolução-precipitação nas primeiras fases, seguido de um processo topoquímico. O enrijecimento da pasta é caracterizado pela hidratação dos aluminatos e a evolução da resistência (endurecimento) é realizada pelos silicatos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A reação do C_3A com água é imediata e, por isto, há necessidade de adição de sulfato para retardar a reação. A hidratação dos aluminatos na presença de sulfato resulta na etringita ($C_6AS_3H_{32}$), que assume formas aciculares e em monossulfatos hidratados com a forma de placas hexagonais delgadas. A formação das agulhas de etringita

começa minutos após o início da hidratação, sendo responsáveis pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial. Dependendo da proporção alumina-sulfato do cimento Portland, depois de alguns dias a etringita pode tornar-se instável e decompor-se para formar o monossulfato hidratado, que é uma forma mais estável.

Os principais compostos resultantes da hidratação do cimento Portland são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH) e os sulfoaluminatos de cálcio, além de partículas de clínquer não hidratadas. O C-S-H constitui entre 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada, sendo o principal responsável pelas suas propriedades mecânicas. A estrutura do C-S-H varia desde formas semicristalinas até altamente cristalinas, não tendo sido ainda completamente descobertas todas as estruturas possíveis para esta fase, embora uma larga gama de C-S-H já seja conhecida, sabendo-se que as suas fases cristalinas são formadas a altas temperaturas (BLACK *et al.,* 2003; ANJOS *et al.,* 2011) e as fases semicristalinas a amorfas estão presentes nas hidratações à temperatura ambiente.

No caso A, a seguir (Figura 5.14), uma pasta contendo relação água/cimento de 0,63 e 100cm^3 de cimento requer 200cm^3 de água, o que totaliza 300cm^3 de volume de pasta ou espaço total disponível. O grau de hidratação do cimento depende das condições de cura (duração da hidratação, temperatura e umidade). Assumindo que, sob as condições de cura da ASTM 31[2], o volume de cimento aos 7, 28 e 365 dias seja igual a 50, 75 e 100%, respectivamente, o volume calculado de sólidos (cimento anidro e produtos de hidratação) é de 150, 175 e 200cm^3. O volume de vazios capilares pode ser determinado a partir da diferença entre o espaço total disponível e o volume total de sólidos, resultando em 50, 42 e 33%, respectivamente, aos 7, 28 e 365 dias de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No caso B (Figura 5.14), considera-se um grau de 100% de hidratação para quatro pastas de cimento preparadas com diferentes consumos de água correspondentes a relações a/c de 0,7, 0,6, 05 e 0,4. Para um dado volume de cimento, a pasta com a maior quantidade de água terá o maior volume de espaço total disponível, mas, após a hidratação completa todas as pastas devem conter a mesma quantidade de produtos sólidos de hidratação. Assim, a pasta com o maior espaço total possuirá um volume total correspondente de vazios capilares. Desta forma, 100cm^3 de cimento com

[2] Que especifica cura úmida a (23 ± 1)ºC até a idade de ensaio.

hidratação completa produziriam 200cm^3 de produtos sólidos hidratados em cada caso. No entanto, uma vez que o espaço total disponível nas pastas com 0,7, 0,6, 05 e 0,4 de relação a/c foi de 320, 288, 257 e 255cm^3, os vazios capilares calculados são iguais a 37, 30, 22 e 11%, respectivamente. Como resultado, para uma pasta com relação a/c de 0,32, não haveria porosidade capilar quando o cimento estivesse completamente hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

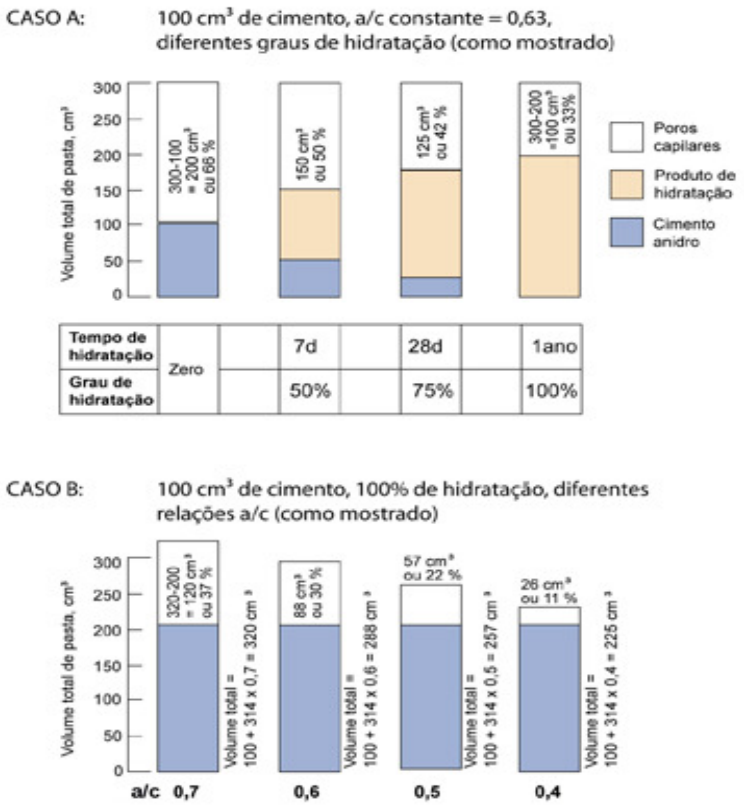


Figura 5.14 – Variações na porosidade capilar com diferentes relações água/cimento e grau de hidratação
Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.37.

Para argamassas de cimento normalmente hidratadas, POWERS e BRUMAUER (1962) demonstraram existir uma relação exponencial do tipo $f_c = ax^3$ entre a resistência à compressão f_c e a relação sólidos-espaço (x), em que *a* é uma constante igual a 234MPa. Considerando certo grau de hidratação, por exemplo, de 25, 50, 75 e 100%, é possível calcular o efeito do aumento da relação a/c inicialmente na porosidade e, subsequentemente, na resistência, empregando-se a fórmula de POWERS e BRUMAUER (1962). Os resultados constam da Figura 5.15.

A pasta de cimento hidratada é alcalina e, portanto, a exposição às águas ácidas pode ser prejudicial ao material. Sob essas condições, 'impermeabilidade' ou 'estanqueidade' torna-se um fator primário preponderante no que tange à durabilidade. A impermeabilidade da pasta de cimento hidratada é uma característica altamente desejável porque se acredita que uma pasta impermeável resultaria em um concreto impermeável (o agregado é geralmente considerado impermeável). A 'permeabilidade' é definida como a facilidade com que o fluido sob pressão pode fluir através de um sólido, sendo certo que o tamanho e a continuidade dos poros na microestrutura do sólido determinariam sua permeabilidade. Resistência e permeabilidade da pasta de cimento hidratada são dois lados da mesma moeda, uma vez que ambos estão estreitamente relacionados à porosidade capilar ou à relação sólido-espaço. Isso fica evidente na curva de permeabilidade mostrada na Figura 5.15, que se baseia em valores determinados experimentalmente por POWERS e BRUMAUER (1962).

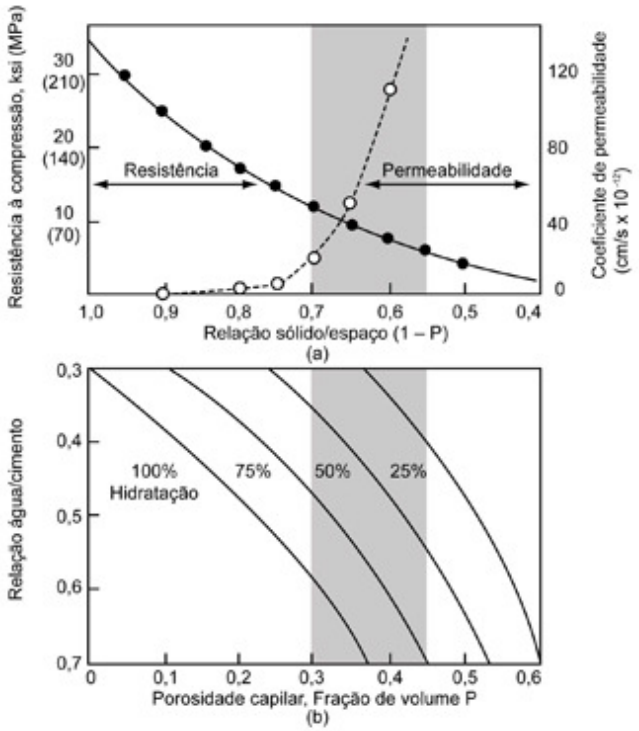


Figura 5.15 – Influência da relação água/cimento e do grau de hidratação sobre a resistência e a permeabilidade
Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.38.

A relação exponencial entre permeabilidade e porosidade mostrada na Figura 5.15 pode ser compreendida a partir da influência que os vários tipos de poros exercem na permeabilidade. À medida que a hidratação se processa, o espaço vazio entre partículas originalmente individualizadas de cimento começa a ser gradualmente

preenchido com os produtos da hidratação. A partir dos dados da Figura 5.16 fica claro que o coeficiente de permeabilidade sofre uma queda exponencial quando o volume dos poros capilares for reduzido de 0,4 para 0,3.

A pasta de cimento hidratada saturada não é dimensionalmente estável. Desde que mantida a 100% da umidade relativa (UR), praticamente nenhuma variação dimensional ocorrerá. No entanto, quando exposto à umidade ambiente, que normalmente é muito menor que 100%, o material começará a perder água e se retrai.

HERMITE (1960) descreve como a perda de água da pasta de cimento hidratada saturada está relacionada à UR por um lado e à retração por secagem pelo outro. Logo que a UR cai abaixo de 100%, a água livre retida nas grandes cavidades (>50nm) passa a evaporar para o meio ambiente. Uma vez que a água livre não está associada à microestrutura dos produtos da hidratação por qualquer ligação físico-química, sua perda não seria acompanhada por retração, como demonstra a curva A-B da Figura 5.16(a).

Desta forma, a pasta de cimento hidratada saturada exposta a uma UR ligeiramente inferior a 100% de UR pode perder uma quantidade considerável de água evaporável total antes de sofrer qualquer retração. Quando a maior parte da água livre tiver sido perdida, verifica-se, no prosseguimento da secagem, que uma perda de água adicional resulta em acentuada retração. Esse fenômeno, mostrado pela curva B-C da Figura 5.16(b), é atribuído, principalmente, à perda de água adsorvida e água retida nos pequenos capilares.

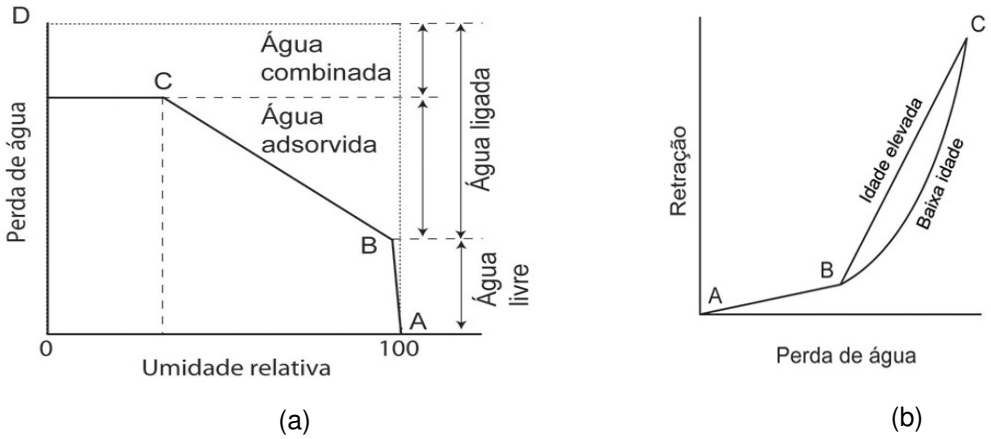


Figura 5.16 – (a) Perda de água em função da umidade relativa; (b) retração de uma argamassa em função da perda de água
Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.39.

Tem sido sugerido que, quando confinada a espaços exíguos entre duas superfícies sólidas, a água adsorvida causa ‘pressão de desligamento’. A remoção da água adsorvida reduz a pressão de desligamento e causa retração do sistema. A água interlamelar, presente como uma membrana monomolecular de água entre as camadas da estrutura do C-S-H, pode também ser removida sob condições severas de secagem, o que ocorre em função do contato mais próximo existente entre a água interlamelar e a superfície sólida e da tortuosidade da trajetória de transporte através da rede capilar requerer maior força motriz. Uma vez que a água nos pequenos capilares (5 a 50nm) exerce ‘pressão hidrostática’, sua remoção tende a induzir uma tensão de compressão nas paredes sólidas do poro capilar, causando, também, contração no sistema.

Estudos de porosimetria por intrusão de mercúrio em pastas hidratadas de cimento, com diferentes relações a/c e em várias idades, demonstram que a redução na porosidade total capilar está associada à redução de grandes poros na pasta de cimento hidratada (Figura 5.17). O intervalo de porosidade capilar parece corresponder ao ponto em que volume e tamanho dos poros capilares em uma pasta de cimento hidratada são reduzidos de forma que as interconexões entre eles deixam de existir. Como resultado, a permeabilidade de uma pasta completamente hidratada pode ser da ordem de 10^6 vezes menor do que uma pasta jovem. Na década de 1960, POWERS e BRUMAUER (1962) demonstraram que, mesmo em uma hidratação completa, uma relação a/c de 0,6 pode se tornar tão impermeável quanto uma rocha densa, como basalto ou mármore.

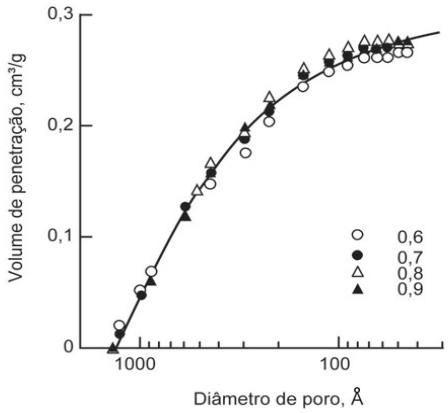


Figura 5.17 – Curvas de distribuição de pequenos poros em pastas de cimento com diferentes relações água/cimento
Nota: Distribuição de tamanho dos poros menores que 1320 Å para corpos de prova com relações água/cimento de 06, 0,7, 0,8 e 0,9 aos 28 dias.
Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p.41.

Conforme MEHTA e MONTEIRO (2008), as porosidades representadas pelo espaço interlamelar do C-S-H e pequenos capilares não contribuem para a permeabilidade da pasta de cimento hidratada. Ao contrário, com o aumento do grau de hidratação, embora ocorra um aumento considerável no volume dos poros devido ao espaço interlamelar do C-S-H e pequenos capilares, a permeabilidade sofre grande redução. Na pasta de cimento hidratada, foi observada uma relação direta entre permeabilidade e volume de poros maiores do que 100nm3. Isto se dá, provavelmente, porque os sistemas de poros, constituídos principalmente por pequenos poros, tendem a se tornar descontínuos.

ANJOS *et al.* (2012) comentam que o ganho de resistência de concretos com adição mineral é mais lento devido ao aumento no tempo inicial e final da pega, que pode chegar a mais de 100% em pastas de cimento e cinza volante, em proporções de 62,5% e 37,5% em massa. Este nível de substituição do cimento pode ser considerado convencional, uma vez que, na prática, são correntes teores de adição de até 40% da massa de ligante (ALONSO; WESCHE, 1991) e, portanto, teores acima deste podem ser considerados como sendo ‘elevados teores de adições’ (HOPPE FILHO *et al.,* 2013). MALHOTRA (2002) propôs a divisão dos concretos com cinzas volantes em duas classes, tendo em conta a quantidade de cimento substituído: concretos com cinzas volantes (em massa), inferior a 50% e superior a 50%.

Considerada revisada a literatura necessária ao estudo, o próximo capítulo discorre sobre os materiais e métodos utilizados. Os itens envolvem a infraestrutura e recursos, fases da pesquisa, análises prévias e comentários.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa se ocupa do estudo da viabilidade de emprego do agregado constituído pelo rejeito de *sinter feed* jigado, um resíduo do processo de produção do minério de ferro, obtido inicialmente pelo rolo magnético, usualmente, existente e utilizado nas plantas de beneficiamento do minério e, posteriormente, submetido ao processo de jigagem[3], alcançando, assim, sua condição final de deposição. Ocupa-se também do conhecimento detalhado da interface pasta/agregado dos concretos estudados. Até o momento, não há demanda comercial clássica para este rejeito, que vem sendo depositado, ao longo dos anos, em enormes pilhas junto às áreas de mineração, causando grandes danos ao meio ambiente e exigindo gastos com os custos relativos ao seu transporte interno, manuseio e estoque, controle e acompanhamento ambientais.

A abordagem situacional tem como referência as plantas de mineração operadas pela empresa Itaminas (ITM), no município de Sarzedo, as quais representam bem o perfil de mineração de ferro desenvolvido nos demais complexos da região.

Em ,Sarzedo, na Mina de Jangada, a Itaminas alimenta em suas unidades de tratamento de minério de ferro ITM 4, 5 e 6 cerca de 550.000t/mês, produzindo de 80 a 85% de minério de ferro e gerando de 20 a 15% de rejeito fino, também chamado “finos de barragem”, que é direcionado para barragens de rejeito e que, por sua característica, não constituiu objeto desta pesquisa. A produção dessas unidades é totalmente direcionada à exportação pela empresa Vale.

Em suas unidades ITM 2 e 8, cuja produção é direcionada para as empresas Gerdau-Açominas, Cosipa e Vale S. A., esta última visando à exportação, são alimentadas cerca de 260.000t/mês do explorado, produzindo algo da ordem de 68% de *sinter feed*, 12 a 15% de *pellet feed* e o restante constituindo os finos de barragem e o **rejeito de *sinter feed***, objeto do presente estudo.

[3] Jigagem é um processo de concentração gravimétrica mineral. Baseia-se na diferença de densidade existente entre os minerais presentes no minério, utilizando-se de um meio fluido (água ou ar) para efetivar a separação/concentração. Os equipamentos tradicionalmente utilizados são os jigues, usados na mineração de ouro, ferro e outros minérios. Na mineração de ferro, a jigagem pode ser utilizada como um segundo processo de concentração quando o rejeito gerado no processo do rolo magnético ainda apresenta teores elevados de Fe.

A geração do rejeito de *sinter feed* nessas unidades é da ordem de **500 a 600t/dia**, durante **30** dias por mês, **12** meses por ano, o que corresponde a um volume aproximado de **295m^3/dia**. Trata-se de material que, no processo de produção do minério de ferro, foi submetido a operações de lavagem e peneiramento, apresentando-se sem contaminantes e com razoável regularidade granulométrica.

O rejeito de *sinter feed* em sua configuração final, obtida, atualmente, depois de submetido a um processamento complementar em instalação de jigagem, que propicia uma maior separação do minério de ferro através de sistema gravimétrico, ainda contém significativa quantidade de ferro. Este método de concentração propicia maior recuperação do ferro em relação a processos usados anteriormente.

Os demais materiais envolvidos na pesquisa são os cimentos Portland, CP II - E 32 da Holcim (fabricado em Pedro Leopoldo/MG) e o CP IV - 40 RS da Soeicom (fabricado em Vespasiano/MG), a areia normal do IPT (beneficiada pelo IPT em São Paulo/SP), a areia comum quartzosa lavada média de Esmeraldas (procedente de Areias Fernato em Esmeraldas/MG), as britas calcárias 0 e 1 da Ical (procedente da mineração Ical em São José da Lapa/MG), aditivo plastificante polifuncional Mastermix BF 40 (fabricado pela BASF S.A.) e água comum distribuída pela Copasa/MG.

Uma ampla caracterização física, química, mineralógica e microestrutural dos materiais envolvidos na pesquisa, a critério do pesquisador e seu orientador, foi procedida. Os métodos de análise dos materiais da pesquisa, tendo em vista sua finalidade, foram definidos ou baseados na normalização brasileira e aplicáveis aos materiais constituintes dos concretos e argamassas de Cimento Portland.

Foram preparados dois traços de argamassa, produzidos com o rejeito de *sinter feed* e com a areia normal do IPT (com sua granulometria ajustada à granulometria do rejeito), e mantidos fixos e iguais os demais constituintes. Este procedimento, num primeiro instante, visou conhecer e avaliar aspectos diferenciais da reologia destes materiais. Amostras foram extraídas dos corpos de prova de ambas as argamassas para seu exame macroscópico e análise por microscopia eletrônica de varredura convencional, com ênfase na região de interface das mesmas, no estado endurecido. Os corpos de prova moldados foram cilíndricos, com 5cm de diâmetro e altura de 10cm. Procedimento semelhante foi desenvolvido em uma dosagem pré-estabelecida, desta feita em concretos com e sem o rejeito, este último como substituição total ou parcial

da areia comum quartzosa, visando atender à mescla pré-definida da dosagem, dentro de um parâmetro convencional de concreto plástico (*slump na faixa de 14 +/- 2cm*). Amostras dos respectivos concretos, extraídas dos corpos de prova moldados Ø 10 x 20cm foram objeto das mesmas análises já referidas.

Também em procedimento semelhante ao anterior, foram moldados, com os mesmos traços de concreto, corpos de prova Ø 30 x 10cm, tendo sido submetidos a ensaios comparativos de abrasão hídrica, de acordo com as prescrições do método ASTM C 1138 (1997).

A Figura 6.18 apresenta a sequência fluxogramática da pesquisa, propiciando uma visão mais ilustrativa das etapas e dos procedimentos desenvolvidos.

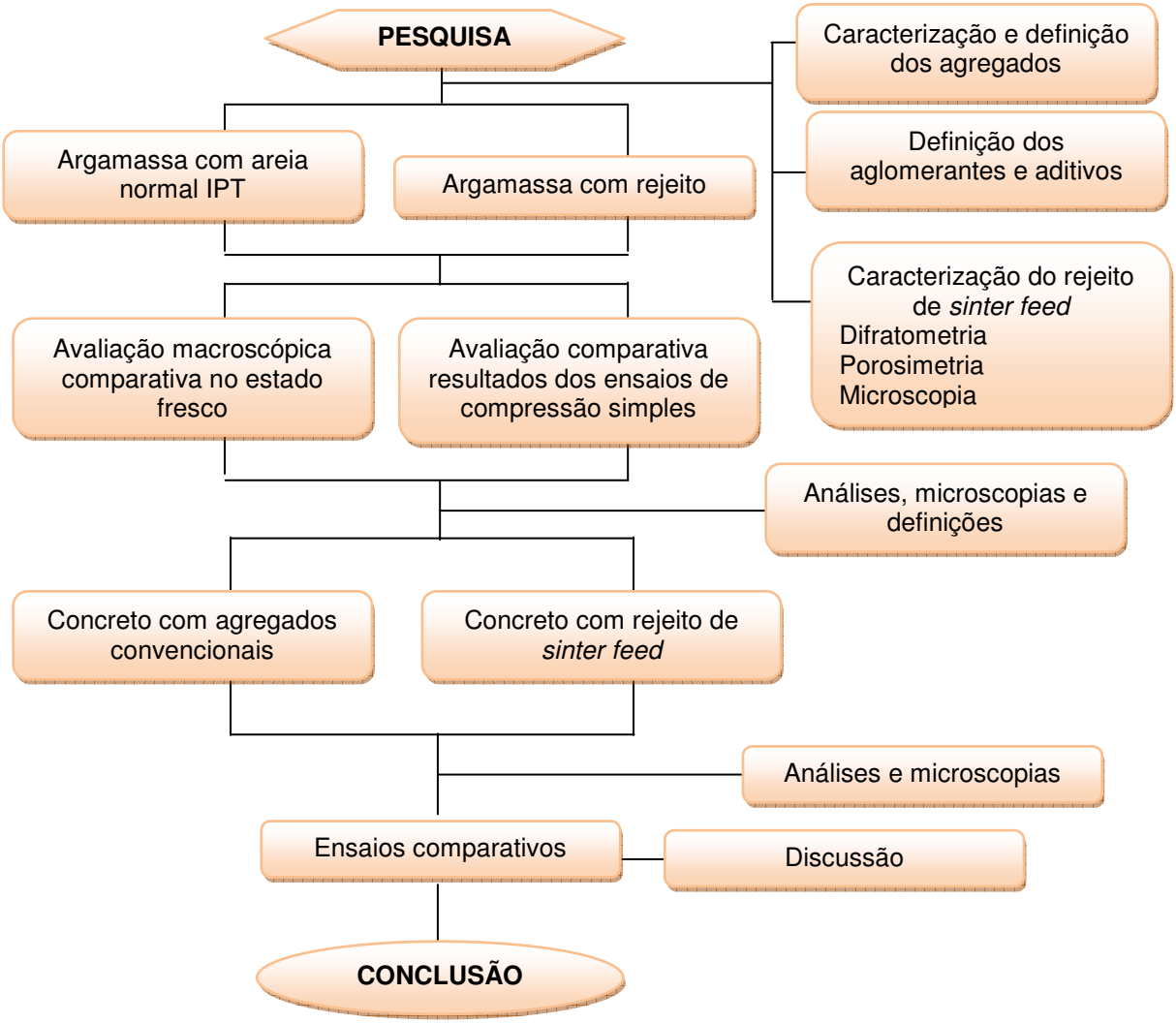


Figura 6.18 – Fluxograma das atividades da pesquisa
Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

6.1. Infraestrutura e recursos utilizados

A infraestrutura para o desenvolvimento da pesquisa e os respectivos recursos necessários foram direcionados aos seguintes envolvidos:

- Ao Laboratório de Análises da ITAMINAS, estabelecido em seu complexo de mineração de Sarzedo/MG, coube as primeiras análises químicas e físicas, e granulometria (por peneiramento) do rejeito fornecido para a pesquisa;
- Ao Laboratório de Concreto do DEMC da EE/UFMG coube o desenvolvimento dos ensaios físicos de caracterização do material empregado como agregado para o concreto e argamassa e ensaios dos respectivos corpos de prova moldados;
- Ao Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMIN da EE/UFMG coube o preparo das amostras para ensaios específicos químicos, de caracterização mineralógica e de microscopia eletrônica de varredura;
- Ao Laboratório de Microscopia Óptica do DEMIN da EE/UFMG coube o preparo das seções polidas do rejeito;
- Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG couberam os ensaios de MEV convencional e também as microanálises EDS;
- Ao Laboratório de Análises por Raios-X do DEMIN da EE/UFMG couberam as análises de difratometria de raios-X;
- Ao Laboratório de Sistemas Particulados do DEMET da EE/UFMG coube a realização das análises de área superficial específica e de porosimetria de adsorção/condensação de nitrogênio;
- Ao Laboratório Minimax coube o ensaio químico de reatividade potencial, suportado pelo projeto “Estudo de Rejeito e Estéreis na Produção de Pelotas”, financiado pela FAPEMIG, em projeto que tem a coordenação do Prof. Dr. Evandro Moraes da Gama e subcoordenação do Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes;
- Aos laboratórios SOLOCAP e PATTROL couberam os ensaios de reatividade potencial, suportados pelo projeto descrito no item anterior;
- Ao CETEC/MG couberam os ensaios de caracterização ambiental, igualmente suportados pelo projeto descrito no item anterior;
- Ao Laboratório de Concreto do DEMC da EE/UFMG coube o ensaio de abrasão sob água, correspondente ao método ASTM C 1138, anteriormente citado nos objetivos secundários da pesquisa.

6.2 Fases da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida em duas etapas principais:

A primeira etapa se constituiu em abrangente abordagem de caracterização físico-química do novo rejeito (rejeito jigado), que constitui o estado final de seu processamento na mina. Trata-se de material sobre o qual se atingiu o máximo de recuperação do Fe pelos processos instalados nos sítios minerários, sendo constituído essencialmente por sílica (quartzo) e óxidos hidratados de ferro (goethita). Nesta nova e última condição, o material atinge sua massa unitária no intervalo esperado (cerca de 1,50 a 1,60kg/dm^3). A viabilidade de emprego do material, em destinação específica, já havia sido comprovada nos estudos e pesquisas descritos por COSTA (2009). Nessa primeira etapa foram desenvolvidos, além dos ensaios físico-químicos de caracterização, as análises necessárias à identificação das fases mineralógicas presentes no material e de caracterização de sua superfície.

A segunda etapa teve como foco principal os estudos comparativos descritos nos objetivos desta pesquisa. Foram estabelecidos traços de argamassa e concreto com a utilização de materiais de uso corrente na construção civil e com o resíduo em estudo. Em corpos de prova moldados e preparados com um e outro agregado foram extraídas amostras e procedidas análises mineralógicas comparativas e por microscopia eletrônica de varredura visando conhecer, estudar e concluir sobre a zona de transição e demais aspectos microestruturais.

Para as argamassas foram tomados como base os parâmetros da Norma Brasileira que estabelece critérios para Ensaio de Qualidade de Agregado Miúdo – NBR-7221.

Para os concretos foram tomados como base os parâmetros de dosagem de uma indústria de pré-fabricados da região de Belo Horizonte, ajustada para concreto de uso convencional, plástico, priorizando a manutenção da mescla granulométrica estabelecida do agregado no traço (*módulo de finura*[4] da mescla).

O registro, análise e discussão dos resultados obtidos e as conclusões alcançadas constituíram um elenco de evidências e demonstrações sobre as características e

[4] O módulo de finura corresponde à soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, dividida por 100. A série normal inicia-se na peneira de 150µm e estende-se em progressão geométrica de razão 2 até à máxima dimensão do agregado.

qualidade das propriedades macro e microestruturais do material, inclusive da interface pasta/agregado, orientando um conjunto de princípios e recomendações para seu emprego em obras e construções civis.

Por fim, foram procedidos ensaios comparativos de abrasão sob água, que integram os objetivos específicos desta pesquisa, visando concluir sobre o desempenho dos concretos submetidos a esta condição.

6.3. Caracterização dos materiais - primeiras análises

A primeira etapa da pesquisa contou com algumas análises físico-químicas, inclusive a difratometria de raios-X, para identificação das fases mineralógicas presentes nos materiais, a determinação da área da superfície específica do rejeito, a sua porosimetria, entre outros.

6.3.1 Amostragem

A coleta de amostras do rejeito e demais agregados foi conduzida de acordo com as prescrições das normas brasileiras NBR 10007 (ABNT, 2004) e NBR 7216 (ABNT, 2001). A amostragem realizada dos materiais foi feita em vários pontos de suas áreas de estocagem: no topo, à meia altura e na base das pilhas, na superfície e em pontos mais internos e em pilhas de formação diversas, de tal forma que a amostra garantisse a representatividade dos materiais coletados. Para seu transporte, houve seu acondicionamento em sacos plásticos apropriados e vedados.

Ênfase especial é dada ao material rejeito de *sinter feed* pelo seu caráter inovador de utilização. Aos demais materiais, por serem tradicionais e sobejamente conhecidos e utilizados, são feitas breves análises e registros, apenas suficientes à sua adequada e necessária referência. São apresentados adiante, em subitens, alguns resultados dos ensaios realizados.

6.3.2. Análise química do rejeito – Laboratório Itaminas

A Tabela 6.8 apresenta o resultado médio de ensaios químicos.

Tabela 6.8 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada – janeiro a julho de 2011

ITAMINAS – MINA JANGADA

LABORATÓRIO DO CONTROLE DE QUALIDADE

		Rejeito sinter feed jigado – Teores %				
		02 a 31/1/11	**01 a 28/2/11**	**01 a 31/3/11**	**01 a 30/4/11**	**01/5 a 30/7/11**
Elementos/ Compostos	***Fe***	44,10	44,88	44,23	38,88	38,50
	SiO_2	32,36	31,28	32,00	40,56	39,19
	Al_2O_3	1,57	0,93	0,90	2,20	1,87
	P	0,105	0,118	0,102	0,098	0,108
	Mn	0,25	0,33	0,16	0,14	0,25
	ppc *	1,73	1,63	1,40	1,65	2,66

Massa unitária: variando de 1,50 a 1,60Kg/dm^3

* ppc = perda por calcinação ou perda ao fogo.

Fonte: ITAMINAS, 2011.

Os valores apresentados na Tabela 6.8 são uma síntese dos resultados fornecidos pelo laboratório da Itaminas na Mina de Jangada, cujo inteiro teor consta em um dos anexos deste texto. Com base nos resultados apresentados e comparativamente com os resultados médios anteriores, antes do jigue, ao recuperar mais Fe no rejeito, as operações de jigue conduziram a um aumento da sílica. Originalmente o Fe ocorria num percentual médio aproximado de 56% e a sílica de 15%.

Cabe ressaltar, entretanto, que os valores anteriormente apresentados (referidos a uma coleta ocorrida no ano de 2011) não correspondem a um padrão fixo do rejeito gerado, os quais, ao longo dos anos e dependendo do local da extração original do material na mina, em frente de desmonte mais ou menos rica em Fe, apresentam variações. Amostragens mais recentes (2013 e 2015) registram valores apresentados nas Tabelas 6.9 e 6.10.

Tabela 6.9 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada – março a abril 2013

Elementos / Compostos	**ITAMINAS – MINA JANGADA** **LABORATÓRIO DO CONTROLE DE QUALIDADE** **Rejeito sinter feed jigado – Teores %**			
	01 a 16.03.2013	**17 a 31.03.2013**	**01 a 13.04.2013**	**14 a 20.04.2013**
Fe	56,58	56,53	60,02	60,12
SiO_2	12,50	13,15	7,18	8,23
Al_2O_3	1,20	1,34	1,23	1,64
P	0,105	0,100	0,062	0,080
Mn	0,19	0,15	0,125	0,15
ppc*	4,73	4,15	5,08	3,50

Massa unitária: variando de 1,58 a 1,62kg/dm^3

*ppc = perda por calcinação ou perda ao fogo

Fonte: ITAMINAS, 2013.

Tabela 6.10 – Resultado médio de ensaios químicos realizados e fornecidos pelo Laboratório da Itaminas – Mina de Jangada – janeiro a junho 2015

ITAMINAS – MINA JANGADA

LABORATÓRIO DO CONTROLE DE QUALIDADE

	Rejeito sinter feed jigado – Teores %					
Elementos / Compostos	**Jan.2015**	**Fev.2015**	**Mar.2015**	**Abr.2015**	**Maio 2015**	**Jun.2015**
Fe	55,55	57,31	57,57	57,03	56,52	55,65
SiO_2	10,4	9,71	9,11	10,87	10,24	13,28
Al_2O_3	2,90	1,87	2,07	1,97	1,28	1,89
P	0,065	0,073	0,073	0,074	0,079	0,083
Mn	0,14	0,156	0,183	0,196	0,193	0,250
ppc*	6,50	6,23	5,87	5,12	6,22	4,63

Massa unitária: variando de 1,58 a 1,62kg/dm^3

*ppc = perda por calcinação ou perda ao fogo

Fonte: ITAMINAS, 2015.

6.3.3. Análise granulométrica do rejeito – ABNT NBR-7211

A Tabela 6.11 corresponde à ficha de laboratório dos ensaios de caracterização física do agregado segundo o método ABNT NBR 7211 (2009). Tais resultados foram obtidos a partir de amostra homogeneizada e constituída a partir de algumas coletas realizadas nas áreas de estoque da Mina de Jangada nos últimos três anos, constituindo, assim, um mix representativo do rejeito mais comumente produzido.

Tabela 6. 11 – Análise granulométrica #1 e caracterização física do rejeito de *sinter feed*

UFMG

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO - ABNT NBR 7211:2009

Registro: 006/12

Amostra Nº: única

U.T./Obra: Ayrton	**Procedência do Material:**		
Local da Coleta:	**Data Chegada:**	**Lote:**	
Descrição da Amostra: Jigue de mineração Fe.	**Data Coleta:**	**Data Ensaio:**	14/04/12
Amostra Total Seca (g) 1500,0 g	**Operador:** Denner e Ian		

Peneira (#)	% Retida			Peneira (mm)
	Peso (g)	% da Amostra Total	% Acumulada	
3	0,0	0,0	0	75
2½	0,0	0,0	0	63
2	0,0	0,0	0	50
1½	0,0	0,0	0	37,5
1¼	0,0	0,0	0	32,00
1	0,0	0,0	0	25,00
¾	0,0	0,0	0	19,00
½	0,0	0,0	0	12,50
⅜	0,0	0,0	0	9,50
¼	0,0	0,0	0	6,30
4	181,4	12,1	12	4,80
8	447,3	29,8	42	2,40
10	375,0	25,0	67	1,20
20	212,3	14,1	81	0,60
50	77,6	5,2	86	0,30
100	56,8	3,8	90	0,15
200	0,0	0,0	90	0,075
Fundo	151,6	10,1	100	-
Total	1502,0	100,0	-	-

Resumo		
Módulo de Finura	-	3,78
Material carbonoso	%	0,00
Torrões de Argila	%	1,3
Diâmetro máximo	mm	6,3
Massa Específica Real	g/cm³	3,33
Massa Específica Aparente	g/cm³	1,65
Material Pulvirulento	%	7,38
Classificação		
Agregado miúdo		

Observação:

Marco Aurélio Morais
Laboratorista

Abdias Magalhães Gomes
Responsável

Fonte: O autor, 2012.

A Tabela 6.12 incorpora as respectivas curvas granulométricas e os limites referenciados de faixas ótima e utilizável dos agregados miúdos.

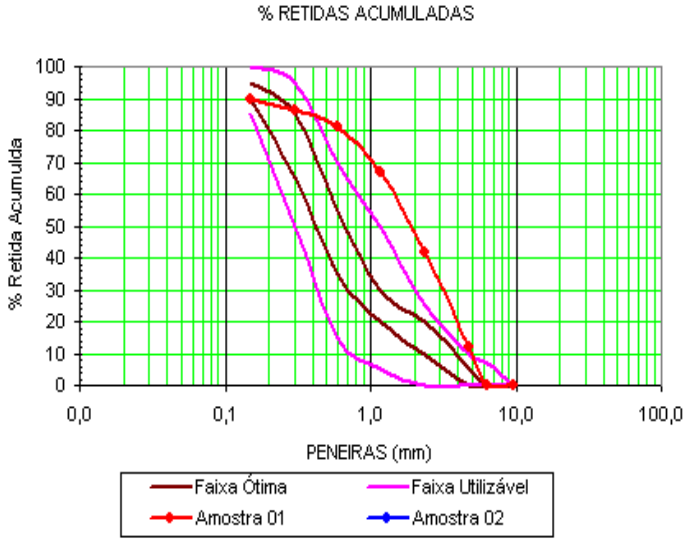
Tabela 6. 12 – Curva granulométrica do rejeito e faixas ótima e utilizável do agregado miúdo

GRANULOMETRIA DA AREIA - NORMA ABNT NBR **7211**

INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
OCORRÊNCIA n.:	01	02	Peneira	% Retida Acumulada	
MATERIAL:	Rejeito Lavado		(mm)	Amostra 01	Amostra 02
NATUREZA:	Ferro-quartizoso.		9,50	0,0	
PROCEDÊNCIA:	Sarzedo		6,30	0,0	
PROPRIETÁRIO:	Itaminas		4,75	12,0	
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.		2,36	41,8	
IMP. ORGÂNICA:	< =300 ppm		1,18	66,8	
ARG. EM TORRÕES:	1,30%		0,60	80,9	
MAT. PULVERULENTO:	7,38%		0,30	86,1	
COEF. DE VAZIOS:	52,25%		0,15	89,9	
MOD. DE FINURA	3,78		fundo	100	

ESPECIFICAÇÃO	PERCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS				
	PENEIRAS	FAIXA ÓTIMA		FAIXA UTILIZÁVEL	
	(mm)	Inferior	Superior	Inferior	Superior
ABNT NBR 7211	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	6,3	0,0	0,0	0,0	7,0
	4,75	0,0	5,0	0,0	10,0
	2,36	10,0	20,0	0,0	25,0
	1,18	20,0	30,0	5,0	50,0
	0,6	35,0	55,0	15,0	70,0
	0,3	65,0	85,0	50,0	95,0
	0,15	90,0	95,0	85,0	100,0

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



Fonte: O autor, 2015.

Com as informações constantes das Tabelas 6.11 e 6.12, percebe-se que o rejeito de *sinter feed* corresponde a um agregado miúdo com módulo de finura 3,78, mas em uma faixa intermediária, superior a uma areia grossa e inferior a um pedrisco, o que leva a pressupor a conveniência de sua conjugação com uma areia para a obtenção de uma mescla mais adequada à utilização desejada.

Aqui também são observadas alterações no rejeito decorrentes das operações de jigue. Sua massa unitária baixou para 1,65kg/dm^3 e a massa específica real para 3,33kg/dm^3. Em estudos anteriores esses parâmetros eram da ordem, respectivamente, de 1,86kg/dm^3 e 3,76kg/dm^3.

Reiterando o que já foi referenciado anteriormente nesse sentido, os valores apresentados neste item 6.3.3 (relativo ao mix) não correspondem a um padrão fixo do rejeito gerado que, ao longo dos anos e de sua geração, apresentam variações.

6.3.4 Análise granulométrica da areia

A Tabela 6.13 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da areia comum utilizada na pesquisa.

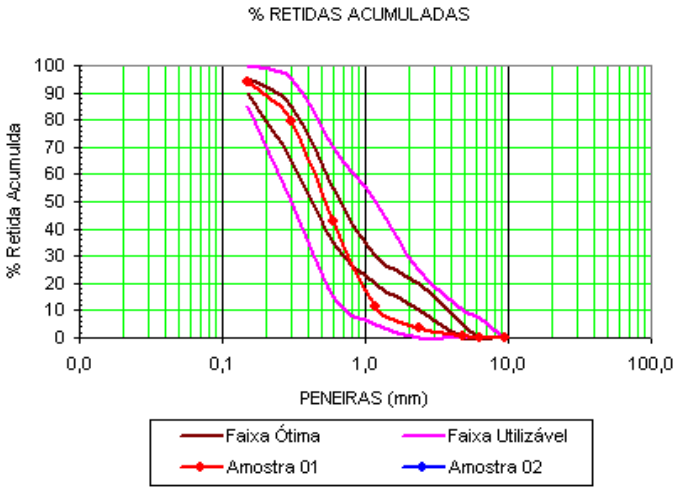
Tabela 6.13 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da areia utilizada

GRANULOMETRIA DA AREIA - NORMA ABNT NBR **7211**

INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
AGREGADO	**01**	**02**	Peneira	% Retida Acumulada	
MATERIAL:	Areia Lavada		(mm)	Amostra 01	Amostra 02
NATUREZA:	Quartzosa		9,50	0,0	
PROCEDÊNCIA:	Esmeraldas		6,30	0,0	
PROPRIETÁRIO:	Dep. Sta. Rosa		4,75	0,8	
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.		2,36	3,4	
IMP. ORGÂNICA:	< =300 ppm		1,18	11,4	
ARG. EM TORRÕES:	0,65%		0,60	42,7	
MAT. PULVERULENTO:	2,86%		0,30	79,6	
MASSA UNITÁRIA	1,339 Kg/dm³		0,15	93,9	
MOD. DE FINURA	2,3184		fundo	100	

ESPECIFICAÇÃO	PERCENTAGENS RETIDAS ACUMULADAS				
	PENEIRAS	FAIXA ÓTIMA		FAIXA UTILIZÁVEL	
	(mm)	Inferior	Superior	Inferior	Superior
ABNT NBR 7211	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	6,3	0,0	0,0	0,0	7,0
	4,75	0,0	5,0	0,0	10,0
	2,36	10,0	20,0	0,0	25,0
	1,18	20,0	30,0	5,0	50,0
	0,6	35,0	55,0	15,0	70,0
	0,3	65,0	85,0	50,0	95,0
	0,15	90,0	95,0	85,0	100,0

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



Fonte: O autor, 2015.

6.3.5 Análise granulométrica da brita 0

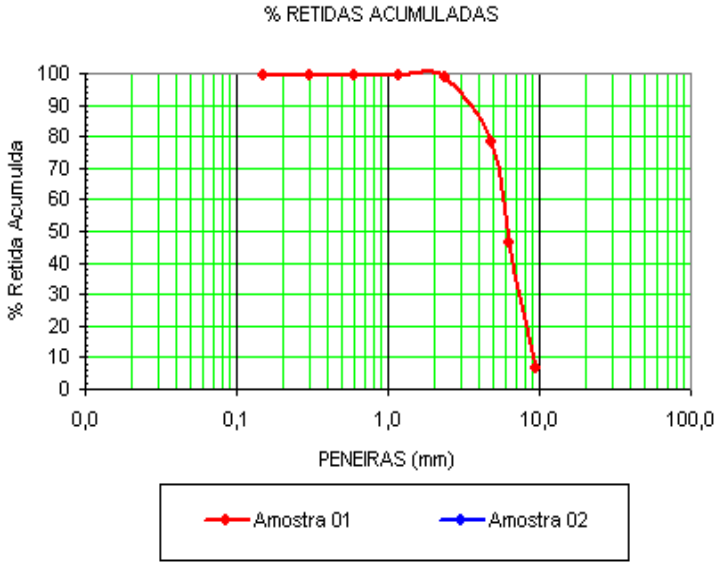
A Tabela 6.14 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 0 utilizada, cuja massa específica apresentou-se em 2,68Kg/dm^3:

Tabela 6.14 – Dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 0

GRANULOMETRIA DAS BRITAS - NORMA ABNT NBR **7211**

INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
AGREGADO	**01**	**02**	Peneira	% Retida Acumulada	
MATERIAL:	Brita 0		(mm)	Amostra 01	Amostra 02
NATUREZA:	Calcária		9,50	6,5	
PROCEDÊNCIA:	Ical		6,30	46,2	
PROPRIETÁRIO:	Dep. Sta. Rosa		4,75	78,2	
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.		2,36	98,6	
IMP. ORGÂNICA:	0%		1,18	99,2	
ARG. EM TORRÕES:	0%		0,60	99,3	
MAT. PULVERULENTO:	1,0%		0,30	99,3	
MASSA UNITÁRIA	1,461 Kg/dm³		0,15	99,3	
MOD. DE FINURA	5,80		fundo	100	

CURVAS GRANULOMÉTRICAS



Observações:

Fonte: O autor, 2015.

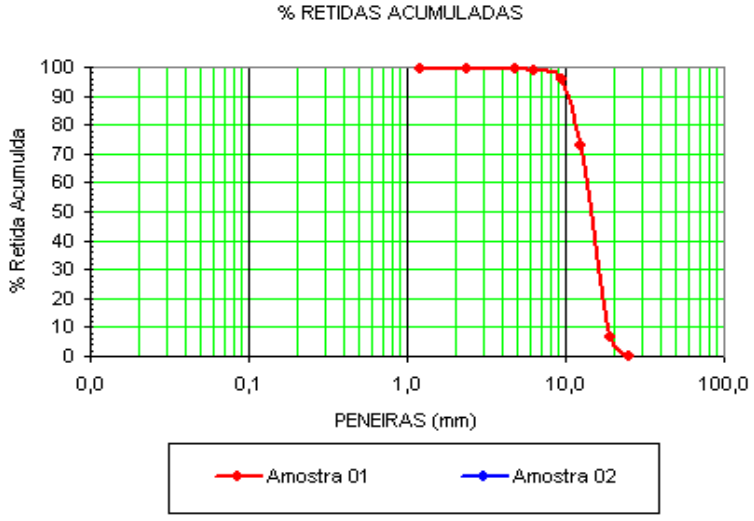
6.3.6 Análise granulométrica da brita 1

A Tabela 6.15 apresenta informações e dados físicos dos ensaios de caracterização da brita 1 utilizada na pesquisa.

Tabela 6.15 – Dados físicos da brita 1

GRANULOMETRIA DAS BRITAS - NORMA ABNT NBR **7211**

INFORMAÇÕES GERAIS			ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
AGREGADO	**01**	**02**	Peneira	% Retida Acumulada	
MATERIAL:	Brita 1		(mm)	Amostra 01	Amostra 02
NATUREZA:	Calcária		25,00	0,0	
PROCEDÊNCIA:	Ical		19,00	6,7	
PROPRIETÁRIO:	Dep. Sta. Rosa		12,50	73,1	
UTILIZAÇÃO:	Argam./Concr.		9,60	95,9	
IMP. ORGÂNICA:	0		6,30	99,0	
ARG. EM TORRÕES:	0%		4,80	99,4	
MAT. PULVERULENTO:	0%		2,40	99,4	
MASSA UNITÁRIA	1,406 Kg/dm³		1,20	99,4	
MASSA ESPECÍFICA	2,659 Kg/dm³		0,60	99,4	
			0,30	99,4	
			0,15	99,4	
MOD. DE FINURA	6,99		fundo	100	



Observações:

Fonte: O autor, 2015.

6.3.7. Ensaios de solubilização e lixiviação do rejeito – ABNT NBR-10006 e 10005

Diante das alterações apresentadas pelo novo rejeito após as operações de jigue, novos ensaios de caracterização ambiental foram executados no Laboratório de

Resíduos Sólidos do CETEC, cujo certificado encontra-se no Anexo deste estudo e os resultados apresentados nas Tabelas 6.16 e 6.17, ambos datados de 2011.

Tabela 6.16 – Resultado dos ensaios de solubilização das amostras A e B e respectivos limites

PARÂMETRO	**A** (mg/l)	**B** (mg/l)	**LIMITE MÁX.** (mg/l)
Prata	**< 0,01**	**< 0,01**	0,05
Alumínio	**< 0,10**	**< 0,10**	0,2
Bário	**0,0125**	**0,0124**	0,7
Cromo	**< 0,04**	**< 0,04**	0,05
Cobre	**< 0,004**	**< 0,004**	2,0
Ferro	**< 0,30**	**< 0,30**	0,3
Manganês	**0,287**	**0,264**	0,1
Sódio	**0,972**	**0,439**	200,0
Zinco	**< 0,02**	**< 0,02**	5,0
Mercúrio	**<0,20** (µg/l)	**<0,20** (µg/l)	0,001
Selênio	**<0,0005**	**<0,0005**	0,01
Arsênio	**<0,0003**	**<0,0003**	0,01
Chumbo	**<0,005**	**<0,005**	0,01
Cádmio	**<0,0005**	**<0,0005**	0,005

Fonte: CETEC, 2011.

Tabela 6.17 – Resultado dos ensaios de lixiviação das amostras C e respectivos limites

PARÂMETRO	**C** (mg/l)	**LIMITE MÁX.** (mg/l)
Prata	**< 0,01**	5,0
Bário	**0,0321**	70,0
Cromo	**< 0,04**	5,0
Arsênio	**<0,0003**	1,0
Cádmio	**<0,0005**	0,5
Chumbo	**<0,005**	1,0
Mercúrio	**<0,20** (µg/l)	0,1
Selênio	**<0,0005**	1,0

Fonte: CETEC, 2011.

Face às condições finais previstas de emprego do rejeito contido no corpo de uma peça de concreto endurecido, a ocorrência de valor acima do limite da Norma no ensaio de solubilização para o manganês determinou uma reavaliação específica dessa análise nas amostras trabalhadas. Foi providenciado um ensaio de contraprova para o referido elemento. O mesmo foi realizado pelo Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Engenharia Química da Escola de Engenharia da UFMG, cujo Laudo de Análise encontra-se no Anexo deste trabalho e do qual se extraiu o resultado apresentado na Figura 6.19:

Informações da amostra

Amostra	Descrição
001	Rejeito de sínter feed da Mina de Jangadas – Itaminas / Sarzedo/MG

Resultados

Amostra	Manganês (µg/g)
001	< 0,01

Observações

- O presente resultado é válido somente para a (s) amostra(s) enviada(s), sendo que a amostragem foi realizada pelo interessado sem a participação do laboratório.
- A indicação menor que indica o limite de detecção correspondente ao elemento no aparelho/técnica (GBC Avanta / Absorção Atômica Modo de Chama) empregado na análise, sendo 1 mg = 1000 µg.
- Ensaios realizados de acordo com ABNT NBR 10.006 – 2004 Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.
- O LAQ não se responsabiliza pelo uso indevido ou má interpretação dos resultados aqui apresentados.
- Este relatório só deve ser reproduzido por inteiro. Reprodução de partes requer aprovação por escrita do laboratório.

Figura 6.19 – Ensaio de contraprova em solubilização para o elemento manganês presente no rejeito
Fonte: Laboratório de Análises Químicas, Departamento de Engenharia Química, Escola de Engenharia da UFMG, 2015.

Torna-se pertinente referir que o Departamento Nacional de Segurança e Saúde do Trabalhador, unidade da Secretaria Nacional do Trabalho do Ministério do Trabalho e da Administração, em sua Portaria DNSST nº 08, estabelece que para os casos de poeiras em suspensão no ar, a concentração de Mn não deve ultrapassar 5mg/m³. Já o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em sua Resolução 20, para situações de água em seu estado natural e dependendo do seu tipo, estabelece concentração que pode variar de 0,1mg/l até 0,5mg/l (máximo). Enfatize-se, contudo, que ambas as situações anteriores não constituem a condição de eventual exposição do elemento em sua forma final de aproveitamento do rejeito dentro dos objetivos desta pesquisa.

Assim, nos ensaios de lixiviação e solubilização, considera-se que nenhum de seus extratos apresentou concentração de seus constituintes acima dos padrões estabelecidos pela Norma Brasileira, o que permitiu a classificação do rejeito, segundo a norma ABNT NBR – 10004, como **Resíduo da Classe II B –** correspondente aos resíduos **inertes**.

6.3.8. Análise da reatividade potencial álcali-agregado do rejeito

As primeiras análises da reatividade potencial álcali-agregado do rejeito foram referenciadas em Costa (2009), executadas, àquela época, pelo método químico, na vigência da norma ABNT NBR 9774, atualmente, fora de vigência. O rejeito de *sinter feed* naquela ocasião mostrou-se inócuo, apresentando uma performance, amplamente, satisfatória. Ainda no início deste trabalho nova análise foi procedida, optando o autor pela manutenção do mesmo método de ensaio, de forma poder avaliar comparativamente o rejeito em sua configuração mais atual. O novo ensaio foi executado no Laboratório Minimax, cujo certificado encontra-se no Anexo e seu resultado plotado no ábaco da Figura 6.20. O resultado numérico não foi outro senão reiterada a condição de agregado '**inócuo**'.

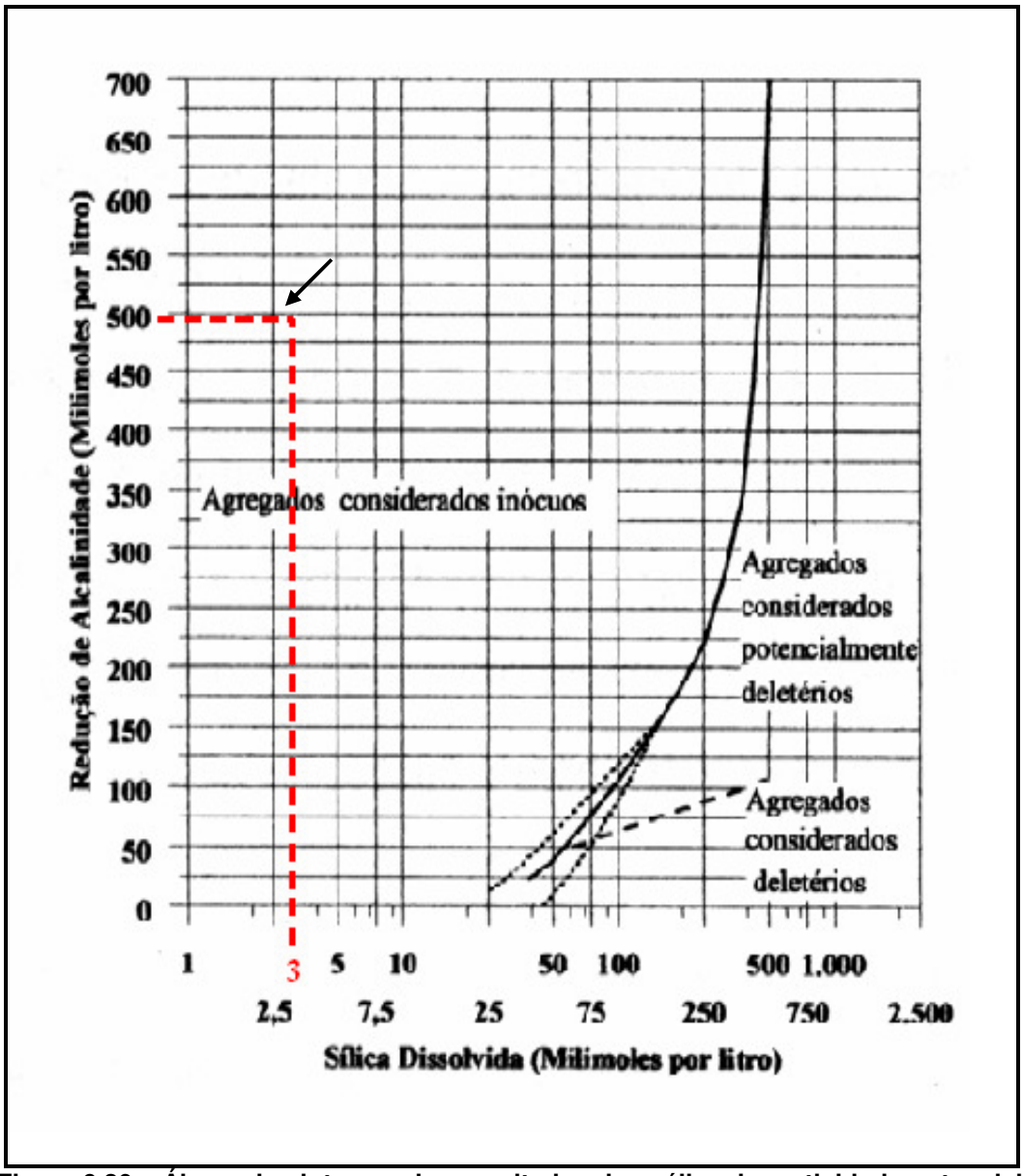


Figura 6.20 – Ábaco de plotagem dos resultados da análise de reatividade potencial
Fonte: O autor, 2015.

As observações das várias amostras dos concretos produzidos, as análises por microscopia de varredura de elétrons e as análises de espectrometria por dispersão de energia (EDS) não evidenciaram, neste trabalho, qualquer necessidade de proceder às avaliações da norma vigente, ABNT NBR 15.577. Verificação neste sentido será proposta para a fase de continuidade deste estudo.

6.3.9. Análise de durabilidade (sanidade) do rejeito

Uma amostra representativa do rejeito foi encaminhada ao laboratório da Solocap – Geotecnia Rodoviária para o ensaio de durabilidade segundo o método DNER 8994, em solução de sulfato de magnésio.

Apenas a título de referência e registro nesta tese, o rejeito em seu estado anterior (antes do jigue) apresentou desgaste de 2,01%, sendo o limite especificado no método em 12%.

Mais recentemente (2015), nova amostra foi encaminhada para ensaio ao laboratório da Pattrol, para análise segundo o mesmo método e nas condições atuais do rejeito. Seu certificado encontra-se no Anexo deste trabalho e seu resultado é apresentado na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Ensaio de durabilidade do agregado

Passando mm	Retido mm	Material Retido		Peso das frações antes do ensaio (g)	Peso das frações final do ensaio (g)	Perda (%)	Perda Corrigida (%)
		Peso (g)	% Retido				
Material Passando na peneira de 9,5 mm							
0,15	-	-					
0,3	0,15	261,34	2,4				
0,6	0,3	269,39	2,5				
1,2	0,6	923,53	8,5	110,00	102,37	6,94	0,6
2,4	1,2	2404,00	22,1	110,00	98,61	10,35	2,3
4,8	2,4	2898,00	26,6	110,00	98,96	10,04	2,7
9,5	4,8	2921,07	26,8				
Material retido na peneira de 4,8 mm							
63,5	38	0,00	0,0				
38	19,0	0,00	0,0				
19	9,5	228,43	2,1				
9,5	4,8	2921,07	26,8	300,00	282,89	5,7	1,5
Perda Total Corrigida(%)							7,1

Fonte: Certificado de ensaio PATTROL, 2015.

No ensaio de durabilidade do agregado, segundo o método DNER 8994, o rejeito apresentou bom desempenho, sendo registrada perda total de 7,1%, bem inferior ao limite da Norma, estabelecido em 12%.

6.3.10. Difratometria de raios-X do rejeito e da areia normal do IPT

Para cada fração do rejeito retida nas peneiras do ensaio granulométrico apresentado nas Tabelas 6.11 e 6.12 foram extraídas amostras que depois de convenientemente pulverizadas foram submetidas à análise de difratometria de raios-X para identificação das fases minerais contidas no material. A Figura 6.21 ilustra a fase de preparação das amostras para as análises.

Para a areia normal do IPT, composta na mesma granulometria do rejeito, ilustrada na Figura 6.22, foi extraída uma única amostra que, depois de convenientemente pulverizada, foi igualmente submetida à análise de difratometria de raios-X, para identificação das fases minerais nela contidas.



Figura 6.21 – Frações pulverizadas do rejeito de *sinter* feed para a difratometria de raios-X



Figura 6.22 – Amostra pulverizada da areia normal do IPT para a difratometria de raios-X

Fonte: O autor, 2015.

Foi utilizado o difratômetro de raios-X da marca Philips Panalytical, modelo PW3710, com geometria θ/2θ e alimentação automática de amostras (Figura 6.23).

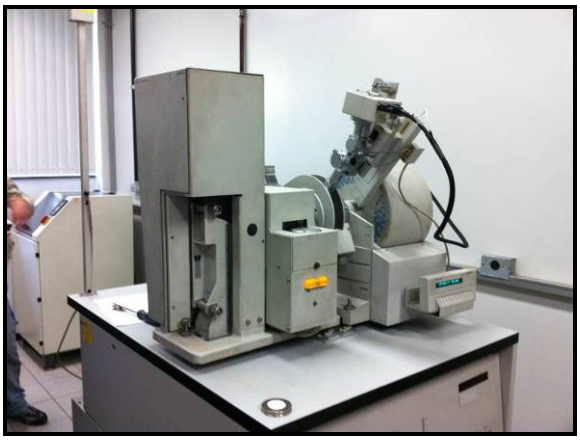


Figura 6.23 – Difratômetro de raios-X da marca Philips Panalytical, mod. PW3710, com geometria θ/2θ
Fonte: O autor, 2015.

As Figuras 6.24 a 6.30 apresentam os difratogramas obtidos para o rejeito referentes às respectivas frações individualizadas e que, pelo seu exame, demonstram semelhança muito próxima entre si. Os elementos mais significativos encontram-se destacados nos referidos difratogramas.

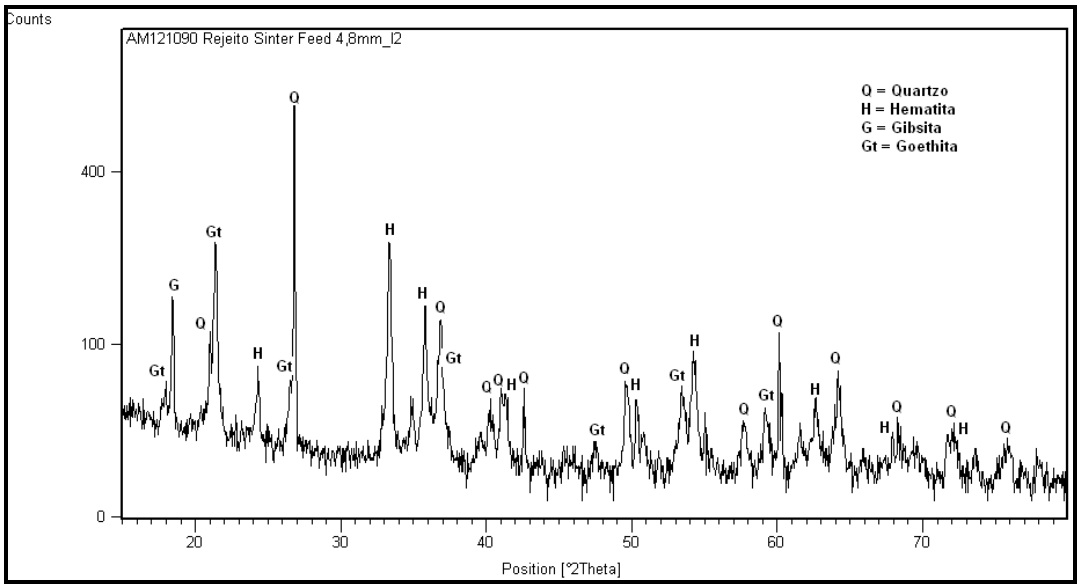


Figura 6.24 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 4,8mm. Q, H, Gt = abundantes; G = baixo
Fonte: O autor, 2015.

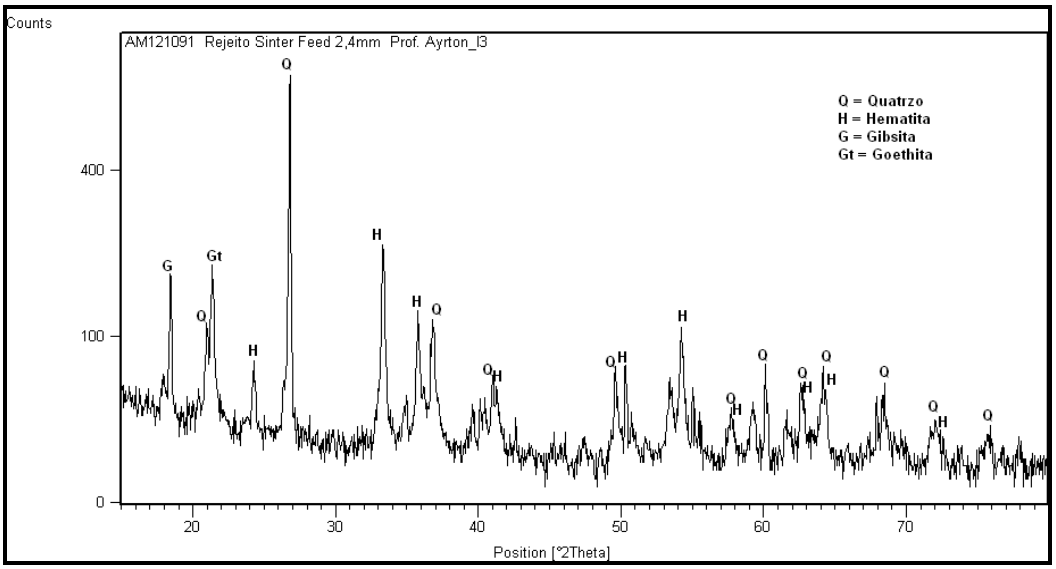


Figura 6.25 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 2,4mm. Q, = abundante; H, Gt =médios; G = baixo
Fonte: O autor, 2015.

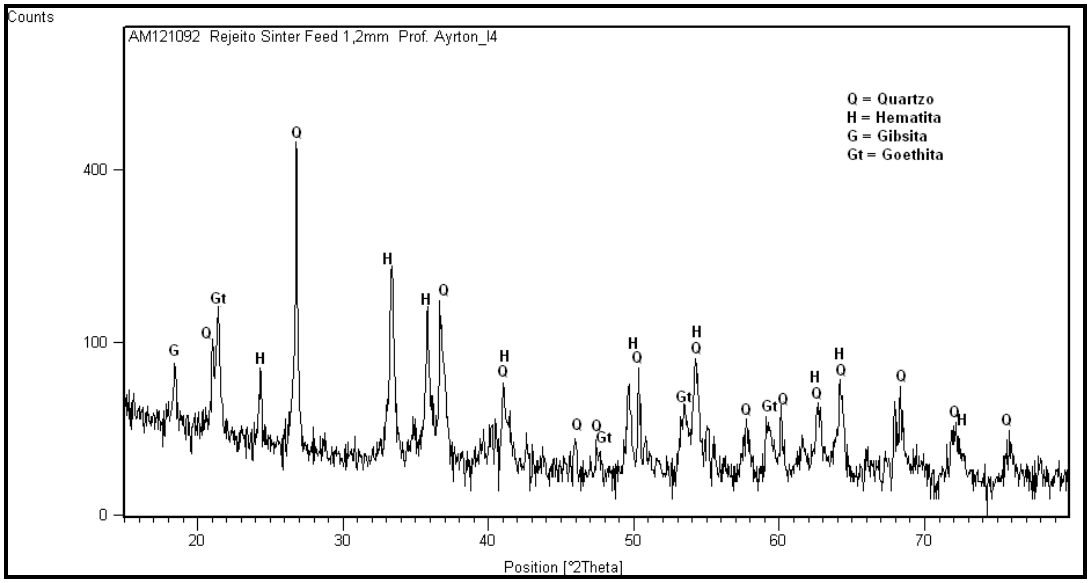


Figura 6.26 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 1,2mm. Q = abundante; H, Gt = médios; G = baixo
Fonte: O autor, 2015.

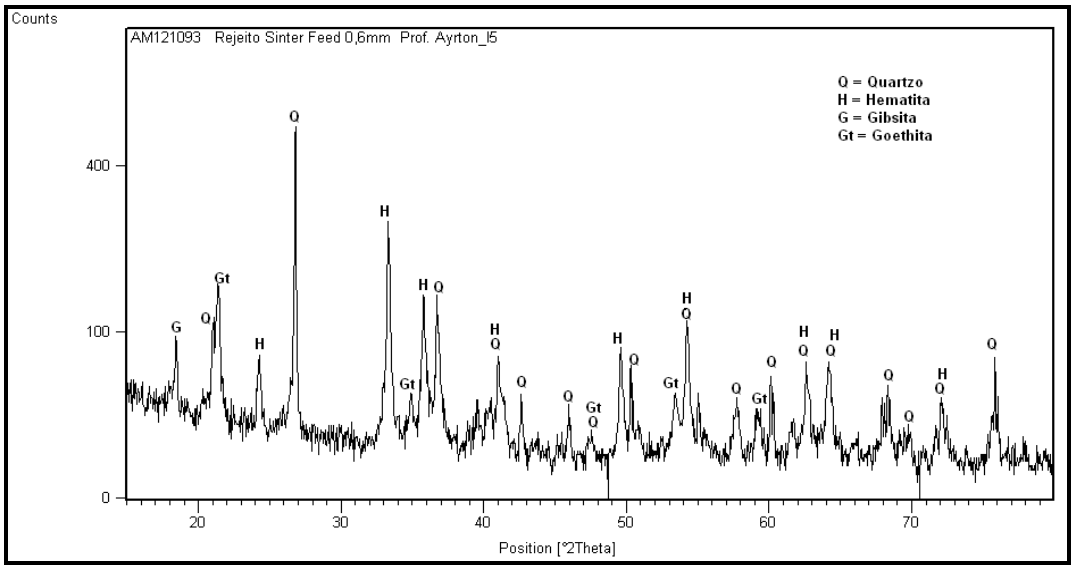


Figura 6.27 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 0,6mm. Q, H= abundantes; Gt =médio; G = baixo
Fonte: O autor, 2015.

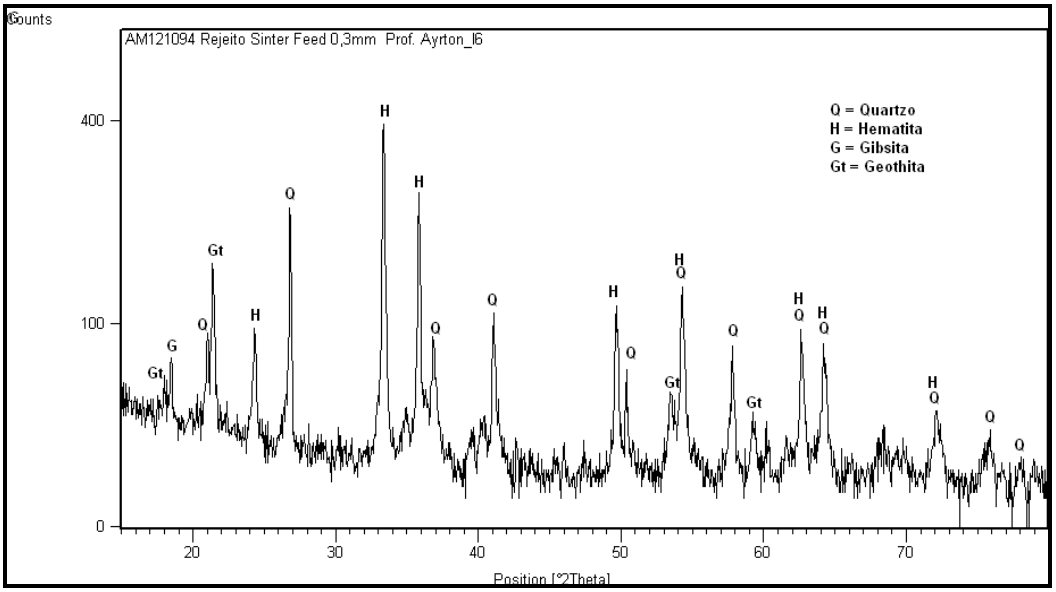


Figura 6.28 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 0,3mm. H = abundante; Q, Gt =médios; G = baixo
Fonte: O autor, 2015.

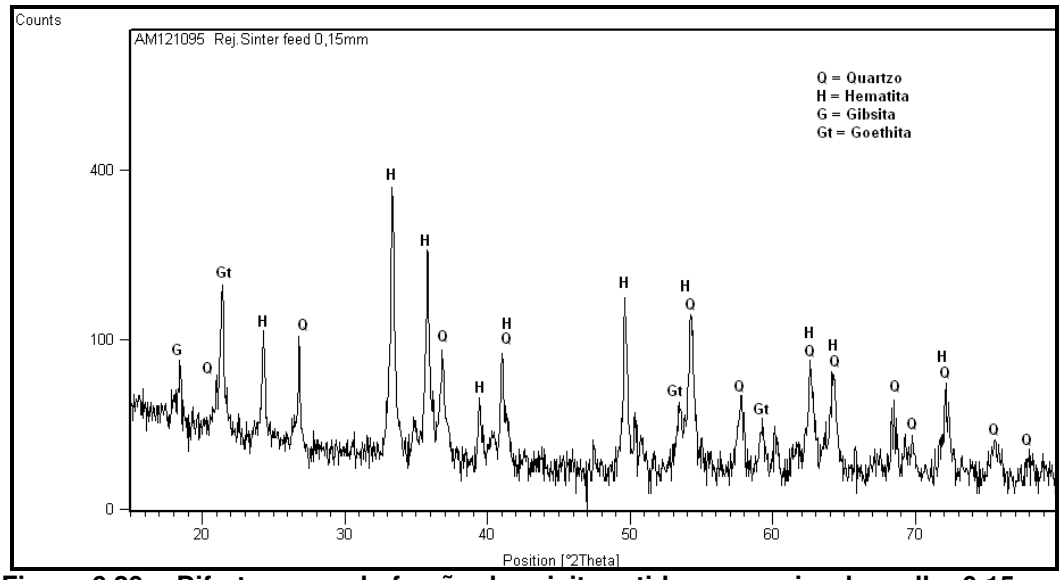


Figura 6.29 – Difratograma da fração do rejeito retida na peneira de malha 0,15mm. H = abundante; Gt =médio; Q, G = baixos
Fonte: O autor, 2015.

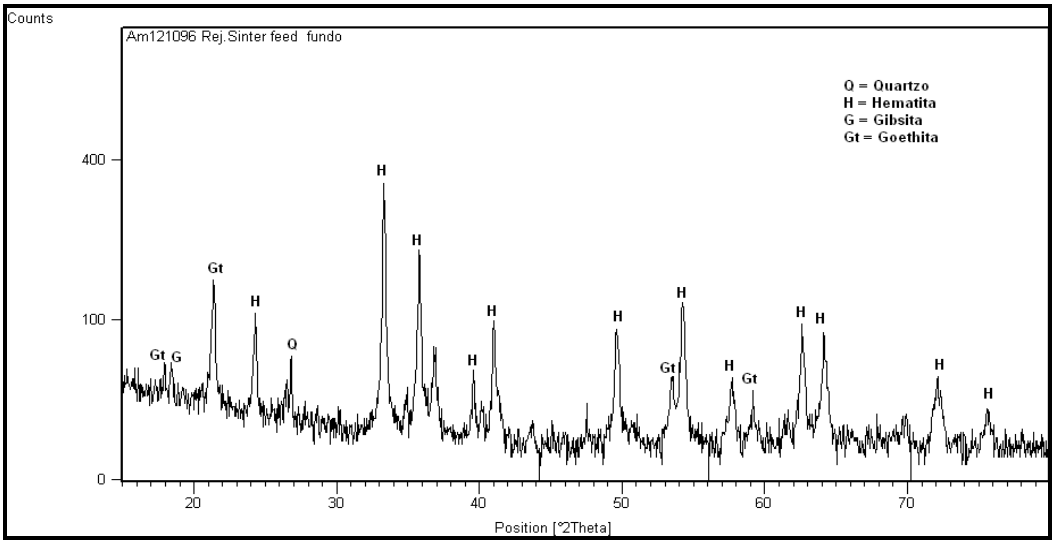


Figura 6.30 – Difratograma da fração do rejeito coletada na bandeja de fundo. H = abundante; Gt =médio; Q, G = baixos
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 6.31 é apresentado o difratograma da amostra pulverizada da areia normal do IPT, sendo destacados os elementos mais significativos.

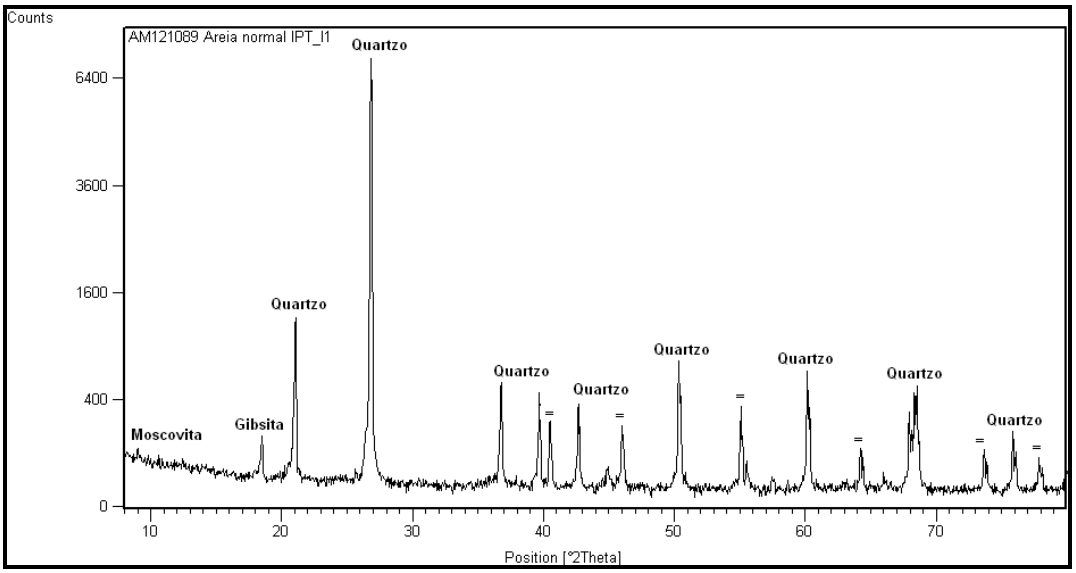


Figura 6.31 – Difratograma da areia normal do IPT
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 6.31 demonstra que a areia normal do IPT é material constituído por quartzo em sua quase totalidade, apresentando-se apenas com alguns traços de moscovita e gibsita.

6.3.11. Área superficial específica (adsorção gasosa) e porosimetria (condensação gasosa) do rejeito e da areia normal do IPT

Para as caracterizações de superfície e para atender condições e conveniências físicas dos ensaios, foram extraídas de determinados volumes do rejeito em estudo e da areia normal do IPT amostras representativas de $Ø_{max}$ = 3mm, identificadas como hm205082012 e hm93082015, respectivamente, as quais foram submetidas ao aparelho Quantachrome Nova 1000 (Figura 6.32) para as respectivas análises.

As Figuras 6.33 e 6.34 ilustram a fase de preparação das amostras dos materiais para os ensaios.

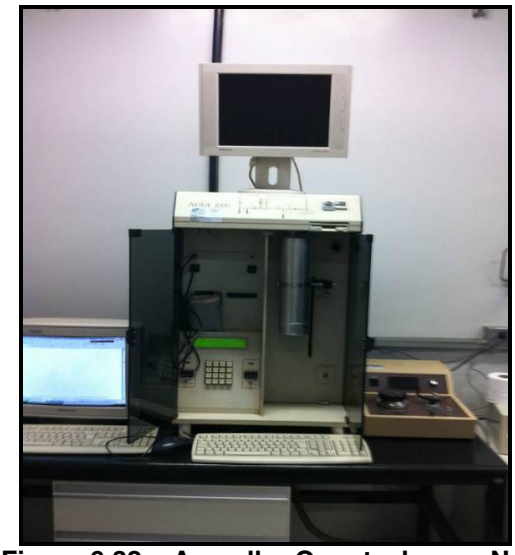


Figura 6.32 – Aparelho Quantachrome Nova 1000
Fonte: O autor, 2015.



Figura 6.33 – Amostra do rejeito de *sinter feed*, para as análises de área superficial específica e porosimetria de adsorção/ condensação de nitrogênio

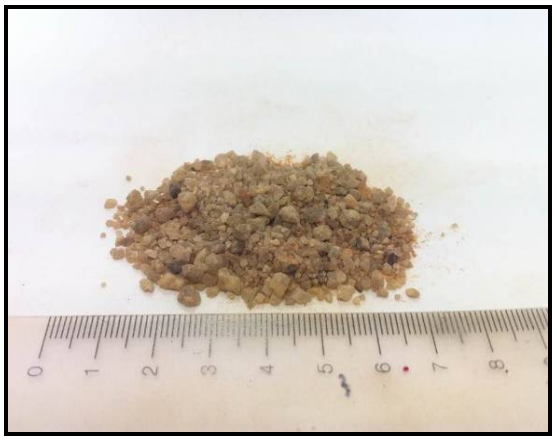


Figura 6.34 – Amostra da areia normal do IPT, para as análises de área superficial específica e porosimetria de adsorção/ condensação de nitrogênio

Fonte: O autor, 2015.

As Tabelas 6.19, 6.20 e 6.21 e as Figuras 6.35 e 6.36 contêm as fichas dos ensaios com as informações e os resultados relacionados ao rejeito nas respectivas análises.

Tabela 6.19 – Ficha de resultados #1

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2007, Quantachrome Instruments
version 9.0

Quantachrome INSTRUMENTS
Optimizing particle performance

Analysis				Report			
Operator:	lda	Date:	2012/08/21	Operator:		Date:	8/21/2012
Sample ID:	hm205082012	Filename:		C:\QCdata\Physisorb\sttn_A_20120821_0.qps			
Sample Desc:		Comment:					
Sample weight:	7.5539 g	Sample Volume:	1.89796 cc		Sample Density:	3.98 g/cc	
Outgas Time:	0.0 hrs	OutgasTemp:	0.0 C				
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	77.3 K				
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Equil time:	60/60 sec (ads/des)		Equil timeout:	180/180 sec (ads/des)	
Analysis Time:	278.2 min	End of run:	2012/08/21 17:52:12		Instrument:	Nova Station A	
Cell ID:	3						

Data Reduction Parameters

t-Method	Calc. method: de Boer				
BJH/DH method	Moving pt. avg.: off	Ignoring P-tags below 0.35 P/Po			
Adsorbate	Nitrogen	Temperature	77.350K		
	Molec. Wt.: 28.013 g	Cross Section:	16.200 Å²	Liquid Density:	0.808 g/cc
	Contact Angle: 0.0 degrees	Surf. Tension:	8.850 erg/cm²		

Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
2.28534e-02	1.5783	1.1857e+01	2.18816e-01	2.4279	9.2309e+01
8.48000e-02	1.9378	3.8257e+01	2.82919e-01	2.6389	1.1963e+02
1.57084e-01	2.2163	6.7277e+01	2.95412e-01	2.6817	1.2510e+02

MBET summary

Slope =	413.385
Intercept =	2.576e+00
Correlation coefficient, r =	0.999943
C constant=	161.494
Surface Area =	8.372 m²/g

Single Point Surface Area

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((P/Po) - 1)]	Slope	Surf. Area [m²/g]
2.95412e-01	2.6817	1.2510e+02	423.4597	8.2240

Fonte: O autor, 2015.

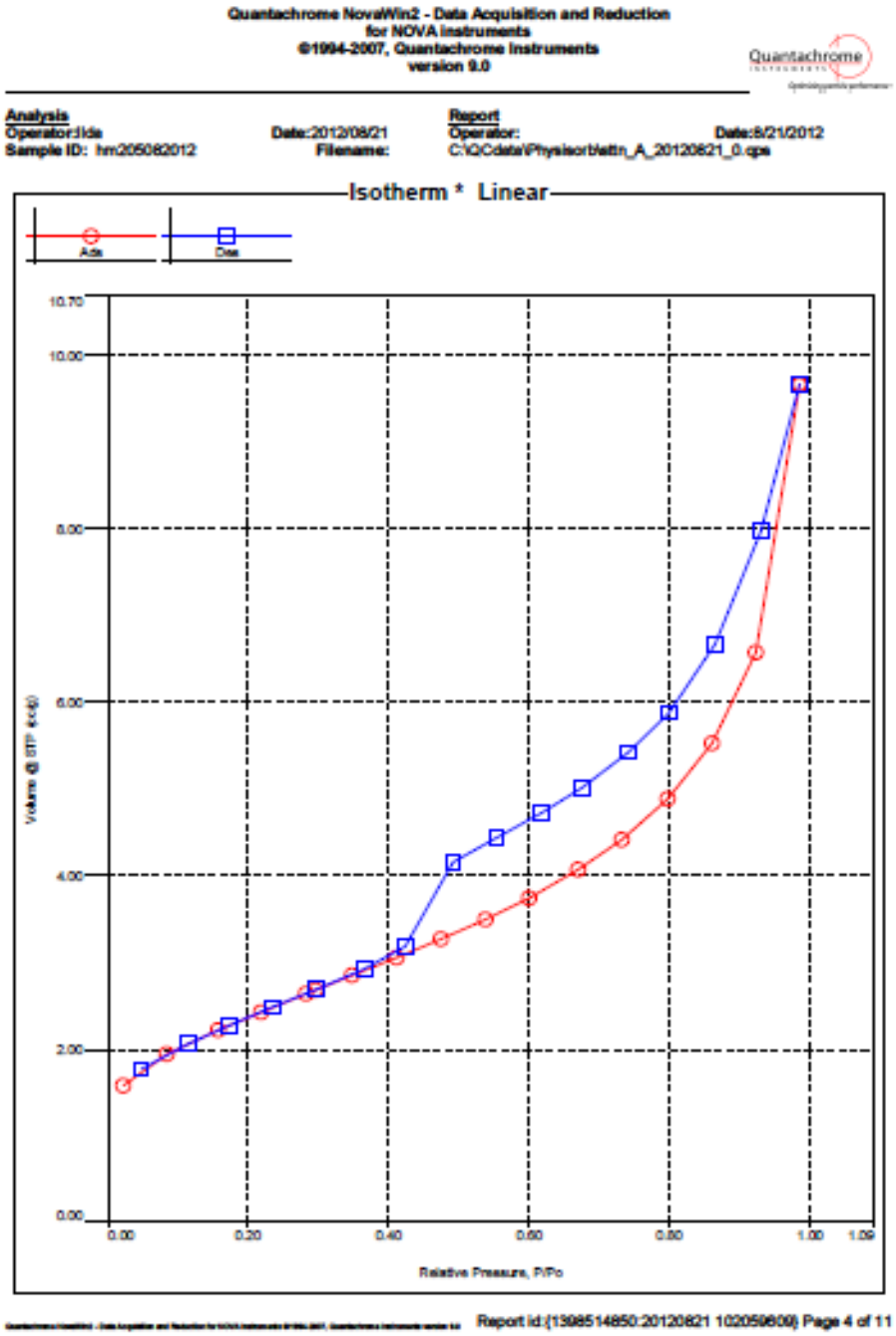


Figura 6.35 – Ficha de resultados #2
Fonte: O autor, 2015.

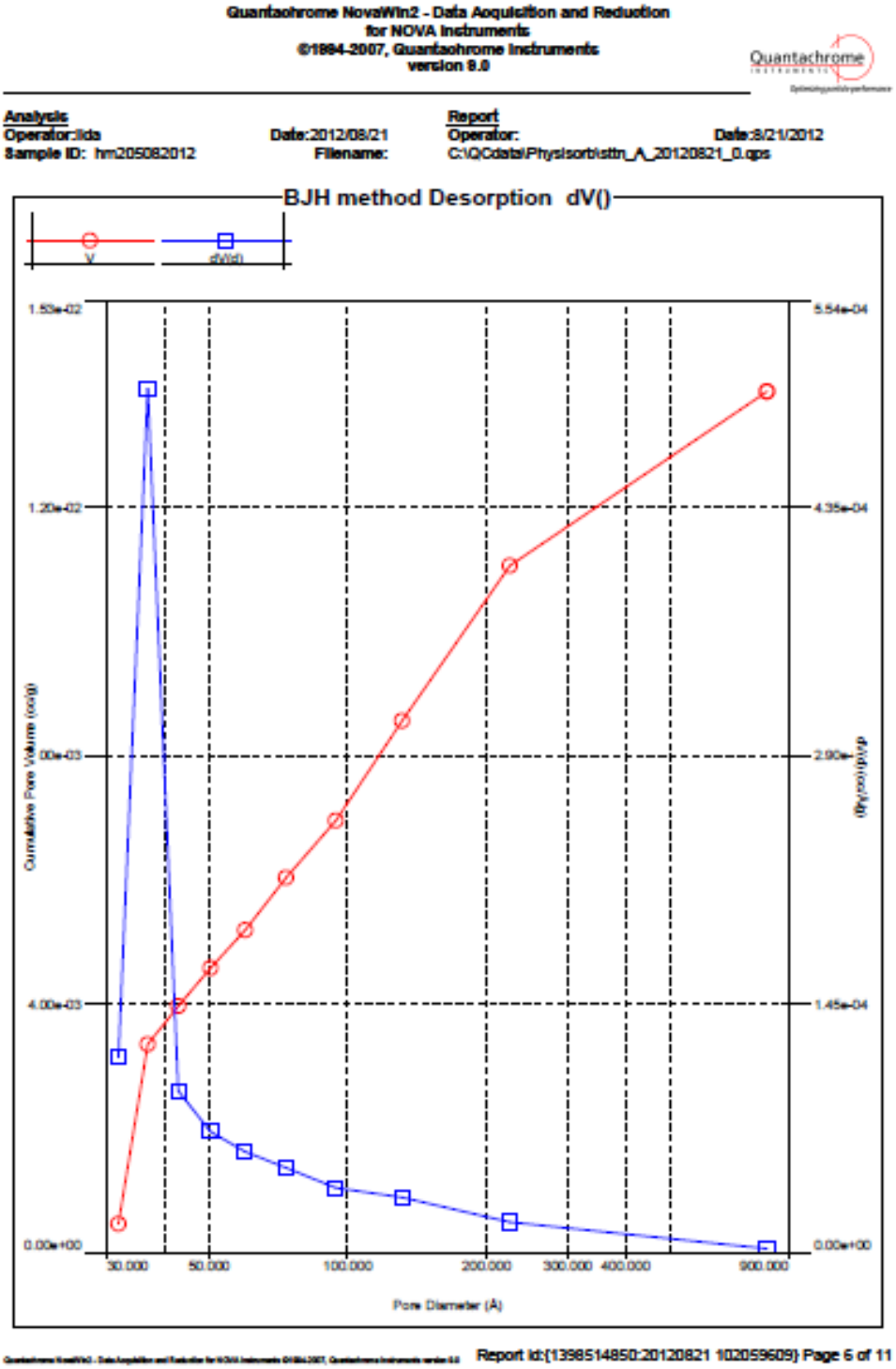


Figura 6.36 – Ficha de resultados #3
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 6.20 – Ficha de resultados #4

Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA Instruments
©1994-2007, Quantachrome Instruments
version 8.0

Quantachrome

Analysis
Operator:ilda Date:2012/08/21
Sample ID: hm205082012 Filename:

Report
Operator: Date:8/21/2012
C:\Q\Cdata\Physisorb\sttn_A_20120821_0.qps

BJH Pore Size Distribution Desorption

Diameter [Å]	Pore Volume [cc/g]	Pore Surf Area [m²/g]	dV(d) [cc/Å/g]	dS(d) [m²/Å/g]	dV(logd) [cc/g]	dS(logd) [cc/g]
31.8910	4.6720e-04	5.8600e-01	1.1399e-04	1.4298e-01	8.3591e-03	1.0485e+01
36.8169	3.3633e-03	3.7325e+00	5.0338e-04	5.4690e-01	4.2586e-02	4.6268e+01
42.9414	3.9706e-03	4.2985e+00	9.4355e-05	8.7953e-02	9.3054e-03	8.6741e+00
50.4140	4.5775e-03	4.7801e+00	7.0820e-05	5.6191e-02	8.2011e-03	6.5070e+00
59.8861	5.1887e-03	5.1884e+00	5.8921e-05	3.9356e-02	8.1045e-03	5.4133e+00
73.5812	6.0358e-03	5.6488e+00	4.9780e-05	2.7061e-02	8.3963e-03	4.5644e+00
94.1552	6.9542e-03	6.0390e+00	3.8056e-05	1.6167e-02	8.2051e-03	3.4858e+00
131.8273	8.5665e-03	6.5312e+00	3.2486e-05	9.9166e-03	9.6835e-03	2.9560e+00
234.1795	1.1049e-02	6.9741e+00	1.8167e-05	3.2415e-03	9.0797e-03	1.6201e+00
807.6533	1.3858e-02	7.1132e+00	2.7260e-06	1.3501e-04	4.2855e-03	2.1224e-01

BJH desorption summary

Surface Area = 7.113 m²/g
Pore Volume = 0.014 cc/g
Pore Diameter Dv(d) = 36.817 Å

Volume/Area summary

Surface Area Data

MultiPoint BET	8.372e+00 m²/g
BJH method cumulative desorption surface area	7.113e+00 m²/g
DH method cumulative desorption surface area	7.332e+00 m²/g
t-method external surface area	7.377e+00 m²/g
t-method micropore surface area	9.954e-01 m²/g
NLDFT cumulative surface area	6.438e+00 m²/g

Pore Volume Data

Total pore volume for pores with Diameter less than 1322.80 Å at P/Po = 0.985265	1.495e-02 cc/g
BJH method cumulative desorption pore volume	1.386e-02 cc/g
DH method cumulative desorption pore volume	1.368e-02 cc/g
t-method micropore volume	3.233e-04 cc/g
HK method cumulative pore volume	3.400e-03 cc/g
SF method cumulative pore volume	3.481e-03 cc/g
NLDFT method cumulative pore volume	1.151e-02 cc/g

Pore Size Data

Average pore Diameter	7.141e+01 Å
BJH method desorption pore Diameter (Mode Dv(d))	3.682e+01 Å
DH method desorption pore Diameter (Mode Dv(d))	3.682e+01 Å
HK method pore Diameter (Mode)	3.675e+00 Å
SF method pore Diameter (Mode)	4.523e+00 Å
NLDFT pore Diameter (Mode)	3.627e+01 Å

Total Pore Volume data

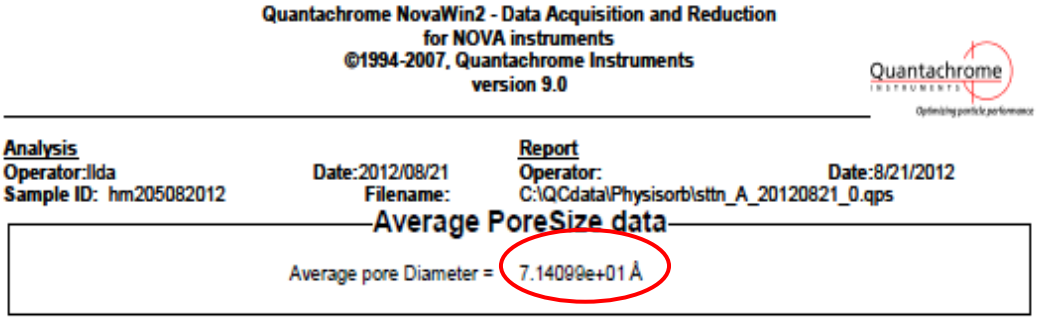
Total Pore Volume

Total pore volume = 1.496e-02 cc/g for pores smaller than 1322.8 Å (Diameter) at P/Po = 0.98527

Report Id:(1398514850:20120821 102059609) Page 8 of 11

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 6.21 – Ficha de resultados #5


Quantachrome NovaWin2 - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2007, Quantachrome Instruments
version 9.0

Quantachrome

Analysis
Operator:Ilda
Sample ID: hm205082012
Date:2012/08/21
Filename:

Report
Operator:
Date:8/21/2012
C:\QCdata\Physisorb\sttn_A_20120821_0.qps

Average PoreSize data

Average pore Diameter = 7.14099e+01 Å

Fonte: O autor, 2015.

De acordo com as informações das Tabelas 6.19, 6.20 e 6.21 e Figuras 6.35 e 6.36 acima apresentadas, a amostra do rejeito de *sinter feed* apresentou uma área superficial específica de 8,372m^2/g. No ensaio, a curva de adsorção aproxima-se do tipo II, isoterma de BET, e na dessorção apresenta histerese do tipo H3, indicativa da ocorrência de mesoporos. Observa-se que o mesmo apresenta um trecho de histerese no intervalo de p/p_0 de 0,40 a 0,95, o que indica a ocorrência de uma significativa população de mesoporos.

Essa histerese se enquadra no tipo H3 segundo os padrões de de Boer, correspondendo à ocorrência de poros com morfologias variadas (*do tipo cone, fenda, cunha, pirâmide*). Ao se analisar as fichas de ensaio, foram constatados poros variando desde 32Å até 810Å, o que corresponde a 3,2ηm a 81,0ηm confirmando se ter de meso a macroporos pela classificação IUPAC.

O maior volume de poros se encontra na dimensão de 36,817Å, com pequenas porções acima dos 200 Å, demonstrando que é um material com características maiores de mesoporos do que macroporos (classificação IUPAC).

O material apresentou um volume total de poros de 0,0149cm^3/g, com diâmetro médio dos poros de 71,41Å, sob o limite de detecção máximo deste ensaio de 1322,8Å, a uma relação de pressão (P/Po) de 0,985265.

A Tabela 6.22 e a Figura 6.37 contêm as fichas dos ensaios com as informações e os resultados obtidos relativamente à areia normal do IPT, considerando-se ser necessário e suficiente apenas a verificação da sua área da superfície específica, face

à montagem de sua granulometria para as análises, tendo em vista sua finalidade na pesquisa.

Tabela 6.22 – Ficha do ensaio da areia normal do IPT

Quantachrome NovaWin - Data Acquisition and Reduction
for NOVA instruments
©1994-2007, Quantachrome Instruments
version 10.01

Quantachrome INSTRUMENTS
Optimizing particle performance

Analysis			Report		
Operator:Ilda		Date:2015/08/25	Operator:Ilda		Date:8/25/2015
Sample ID: hm93082015		Filename:	C:\QCdata\Physisorb\sttn_A_20150825_2.qps		
Sample Desc:	Areia IPT	Comment:			
Sample weight:	14.0775 g	Sample Volume:	0 cc		
Outgas Time:	0.5 hrs	OutgasTemp:	300.0 C		
Analysis gas:	Nitrogen	Bath Temp:	77.3 K		
Press. Tolerance:	0.100/0.100 (ads/des)	Equil time:	60/60 sec (ads/des)	Equil timeout:	240/240 sec (ads/des
Analysis Time:	210.4 min	End of run:	2015/08/25 13:55:36	Instrument:	Nova Station A
Cell ID:	0				

MBET summary

Slope =	3980.185
Intercept =	4.728e+01
Correlation coefficient, r =	0.999912
C constant=	85.181
Surface Area =	0.865 m²/g

Multi-Point BET

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]	Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((Po/P) - 1)]
4.54770e-02	0.1628	2.3414e+02	1.74093e-01	0.2294	7.3512e+02
7.15160e-02	0.1849	3.3332e+02	1.99631e-01	0.2388	8.3572e+02
9.70160e-02	0.1979	4.3430e+02	2.49583e-01	0.2564	1.0378e+03
1.22685e-01	0.2092	5.3474e+02	2.74960e-01	0.2654	1.1432e+03
1.48324e-01	0.2196	6.3453e+02	2.99997e-01	0.2744	1.2497e+03

Single Point Surface Area

Relative Pressure [P/Po]	Volume @ STP [cc/g]	1 / [W((P/Po) - 1)]	Slope	Surf. Area [m²/g]
2.99997e-01	0.2744	1.2497e+03	4165.7950	0.8360

Fonte: O autor, 2015.

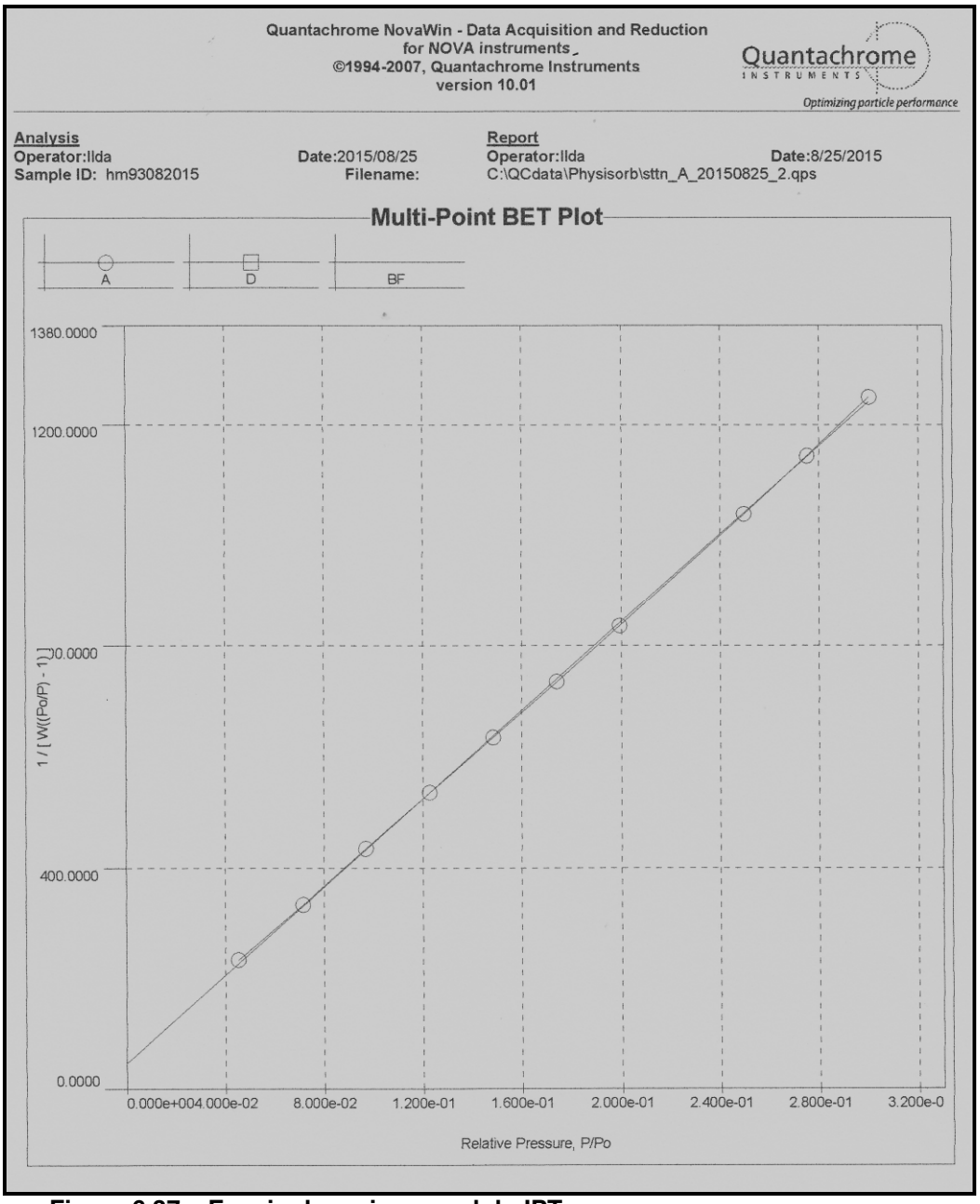


Figura 6.37 – Ensaio da areia normal do IPT
Fonte: O autor, 2015.

6.3.12. Microscopia de varredura de feixe de elétrons (MEV) e espectrometria por dispersão de energia (EDS) do rejeito

A técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV) refere-se à análise microestrutural por meio de imagens de uma amostra determinada. Sequencialmente à obtenção de imagens, através do dispositivo de microanálise de espectrometria por

dispersão de energia (EDS) acoplado ao MEV são obtidas informações químicas da amostra em estudo.

Foi separada uma pequena amostra representativa do rejeito de *sinter feed* em sua granulometria natural, como também preparada uma seção polida, montada em resina (Figura 6.38), que foi objeto de análise em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para análise microestrutural por meio de imagens, com apoio da microanálise de espectrometria por dispersão de energia (EDS), quando foram obtidas informações químicas. Foi utilizado o equipamento MEV-FEG da marca Quanta 200 FEI, do Centro de Microscopia da UFMG (Figura 6.39).



Figura 6.38 – Seção polida de amostra do rejeito de *sinter feed*



Figura 6.39 – MEV-FEG da marca Quanta 200 FEI

Fonte: O autor, 2015.

As Figuras 6.40 a 6.49 correspondem a algumas imagens geradas de elétrons retroespalhados (IER-BSE - *backscattering electrons*), que apresentam um contraste mais intenso devido não apenas à densidade, mas também ao nº atômico dos elementos, imagens adequadas ao conhecimento da topografia/morfologia dos componentes da amostra, uma vez que amplia aspectos de seu relevo, além de propiciar informações sobre a diferença composicional do material. As imagens captadas a partir de elétrons retroespalhados propiciam importante visão topográfica, já que ampliam aspectos de relevo das partículas, destacando mais claras as fases de maior número atômico e mais escuras as fases de menor número atômico. Em cada imagem foram destacadas e numeradas áreas para as quais, em seguida, pela microanálise EDS, serem gerados os respectivos espectrogramas, destacando os elementos identificados nas respectivas fases.

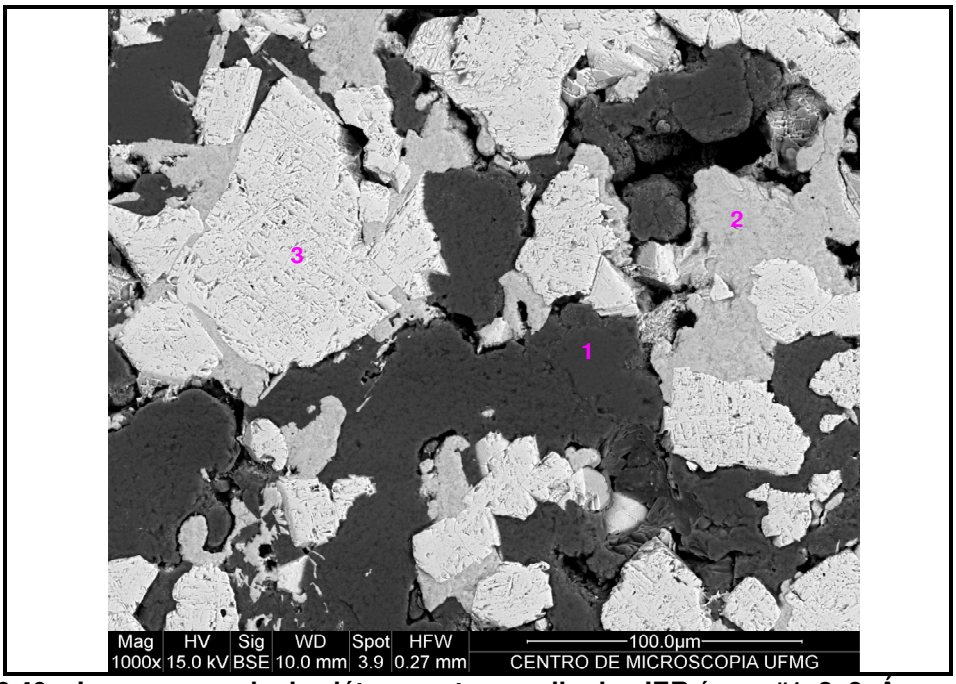


Figura 6.40 – Imagem gerada de elétrons retroespalhados IER áreas #1, 2, 3. Área composta por grãos imbricados de hematita martítica e gibsita, com goethita minoritária; porosidade baixa
Fonte: O autor, 2015.

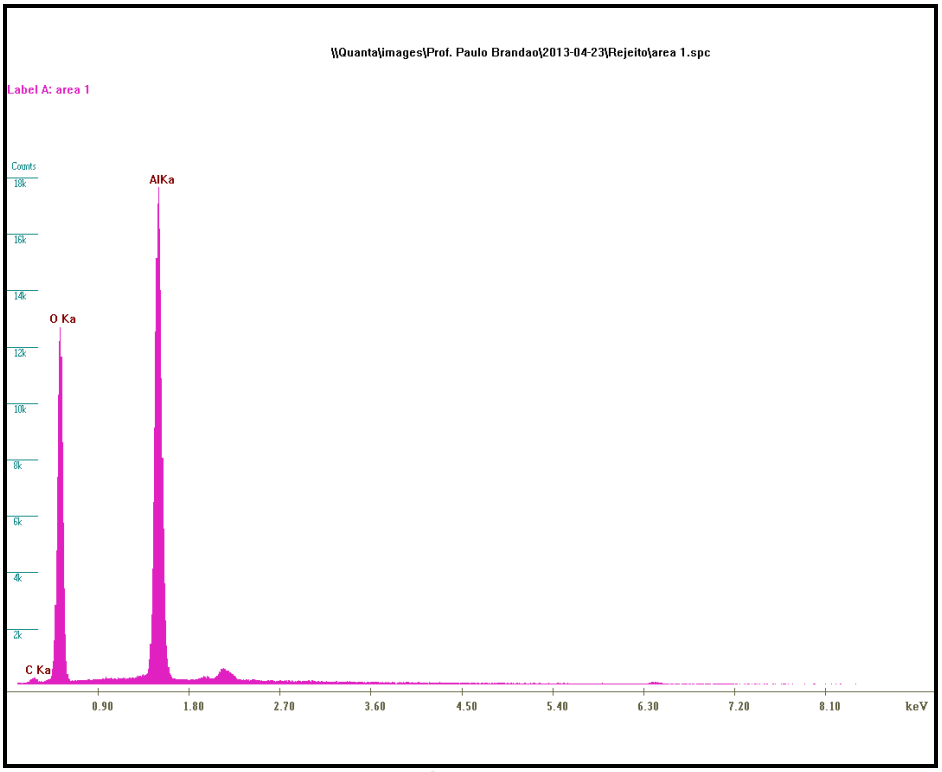


Figura 6.41 – Espectrograma da área 1; grão de gibsita
Fonte: O autor, 2015.

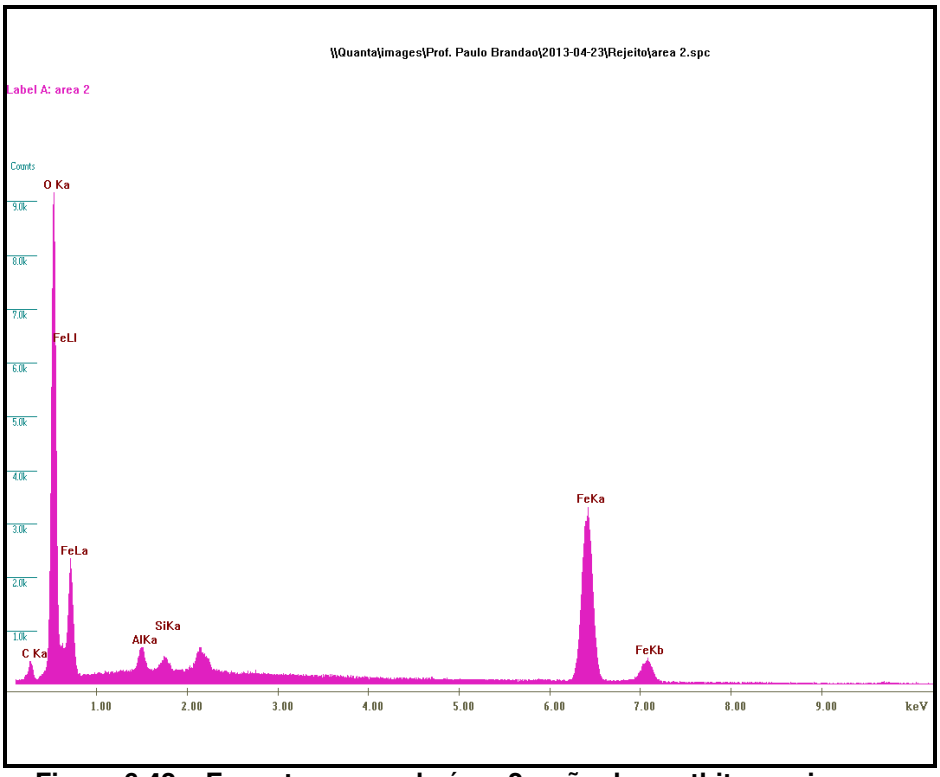


Figura 6.42 – Espectrograma da área 2; grão de goethita maciça
Fonte: O autor, 2015.

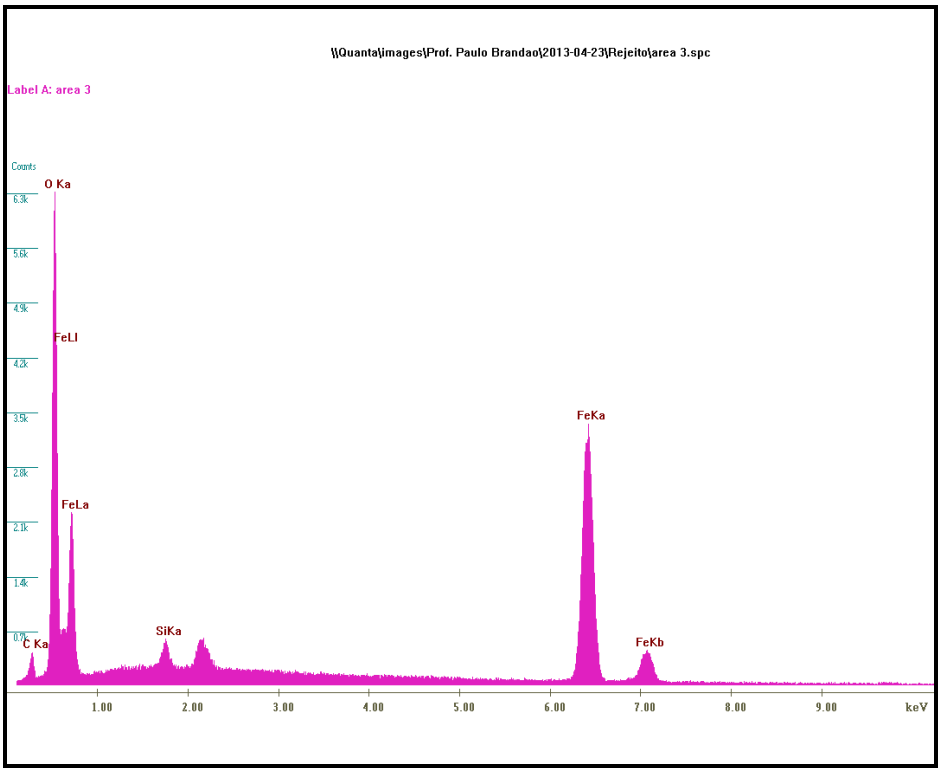


Figura 6.43 – Espectrograma da área 3; grão de hematita martítica
Fonte: O autor, 2015.

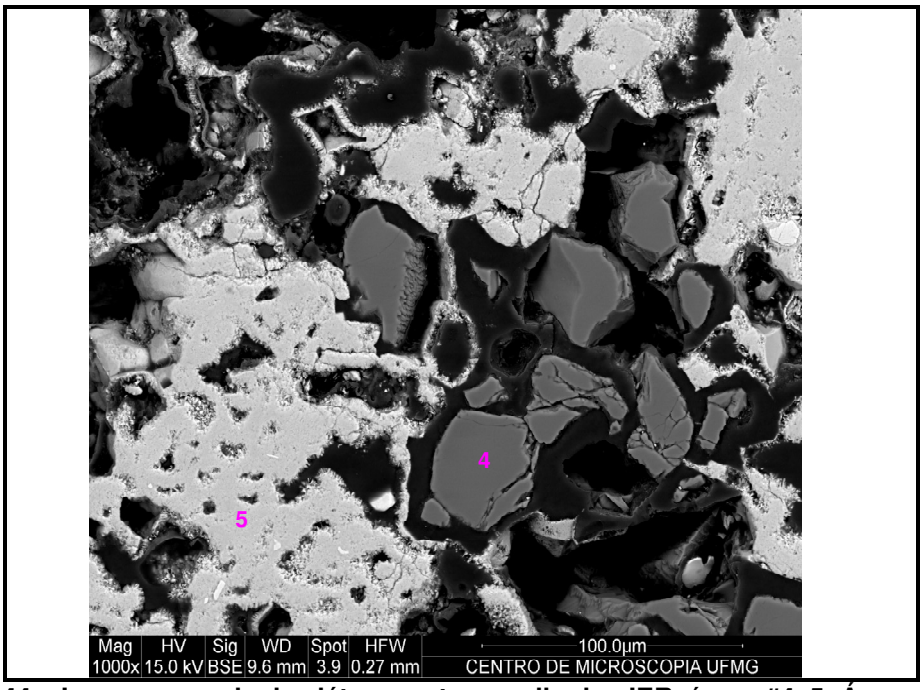


Figura 6.44 – Imagem gerada de elétrons retroespalhados IER áreas #4, 5. Área muito porosa, contendo goethita botrioidal e terrosa, com quartzo minoritário
Fonte: O autor, 2015.

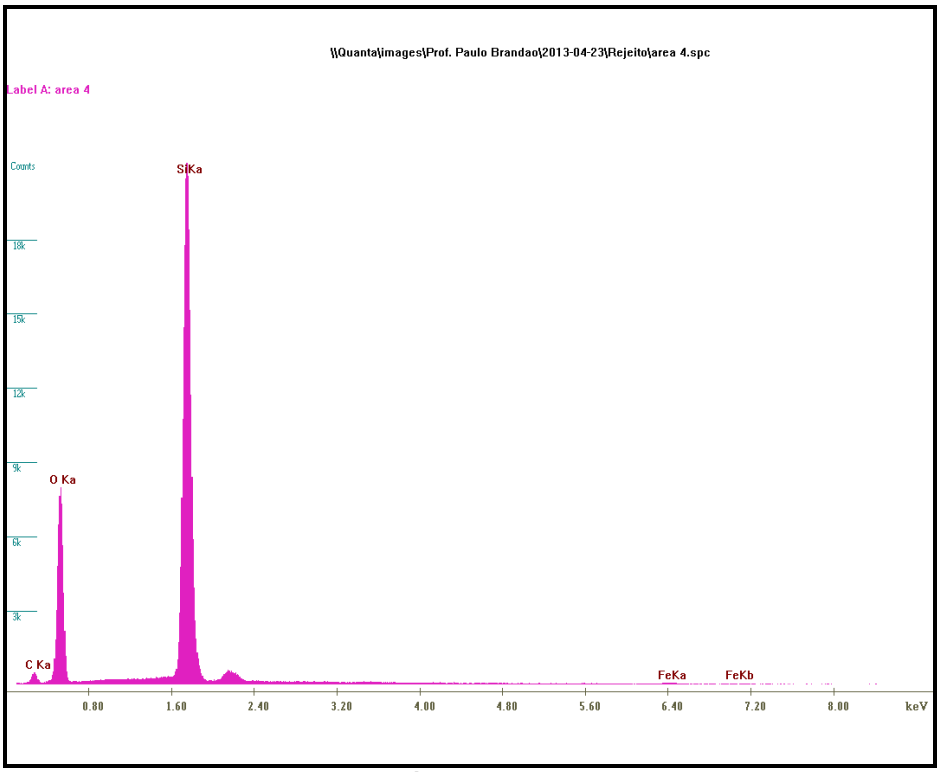


Figura 6.45 – Espectrograma da área 4; grão de quartzo
Fonte: O autor, 2015.

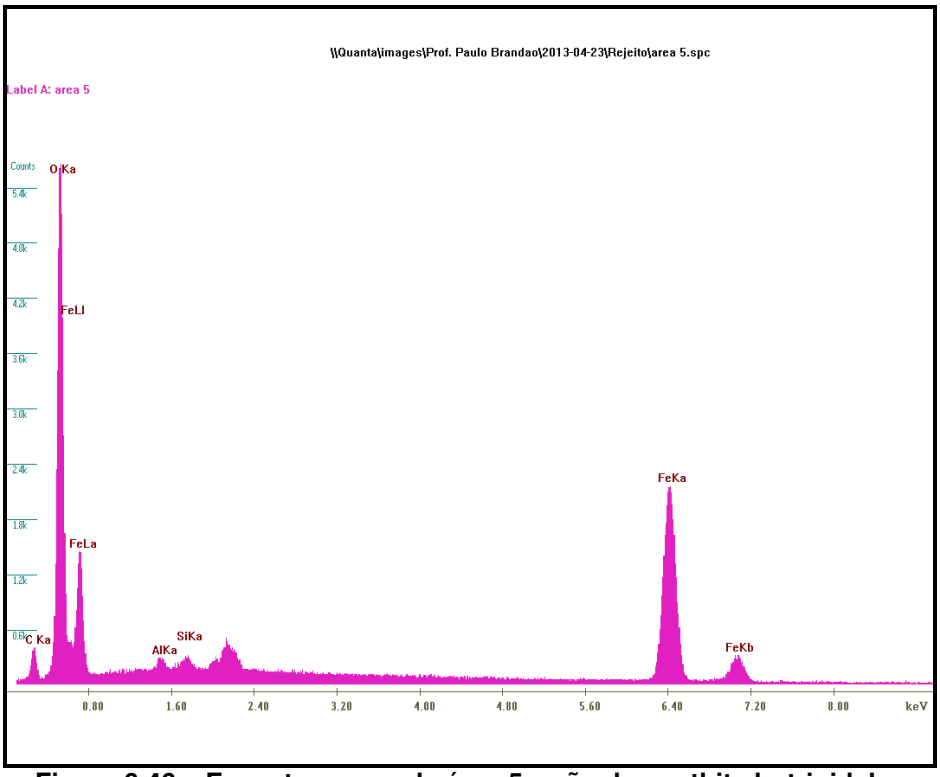


Figura 6.46 – Espectrograma da área 5; grão de goethita botrioidal
Fonte: O autor, 2015.

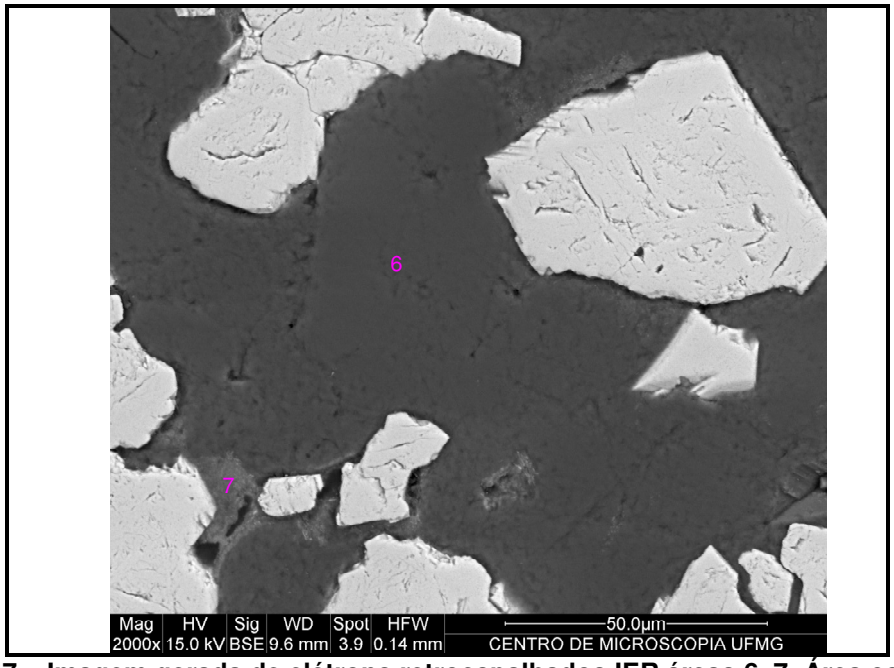


Figura 6.47 – Imagem gerada de elétrons retroespalhados IER áreas 6, 7. Área composta dominantemente por gibsita maciça e hematita martítica
Fonte: O autor, 2015.

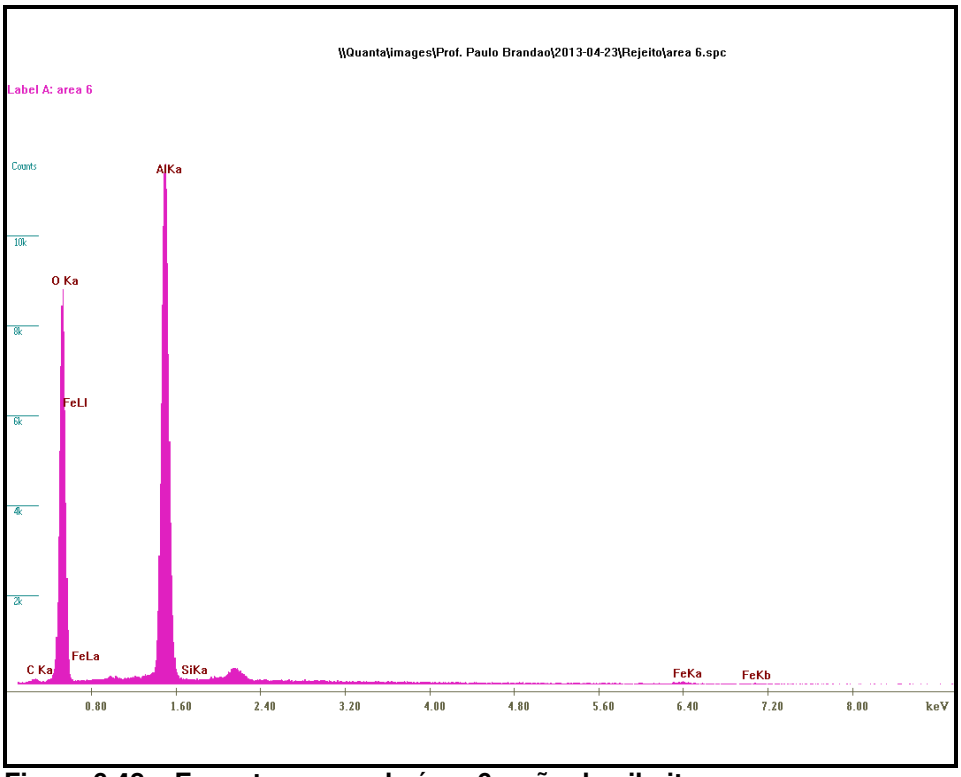


Figura 6.48 – Espectrograma da área 6; grão de gibsita
Fonte: O autor, 2015.

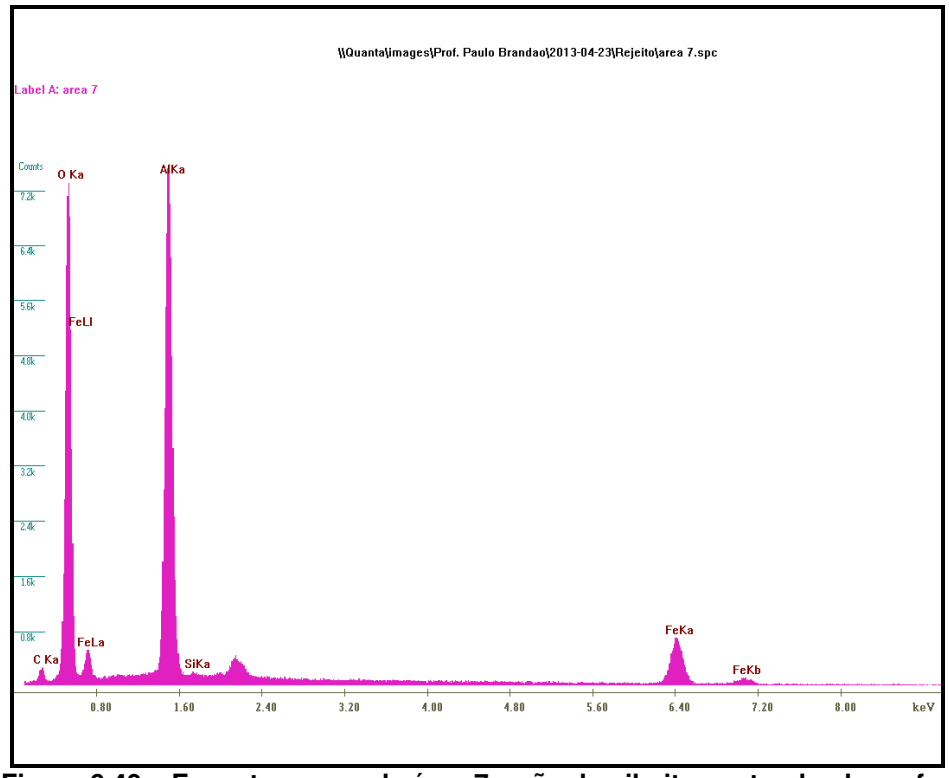


Figura 6.49 – Espectrograma da área 7; grão de gibsita contendo algum ferro
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 6.50 são apresentadas algumas imagens sequenciadas (com destaques), de tal forma que propiciam um conhecimento mais ampliado de alguma das especificidades morfológicas do material.

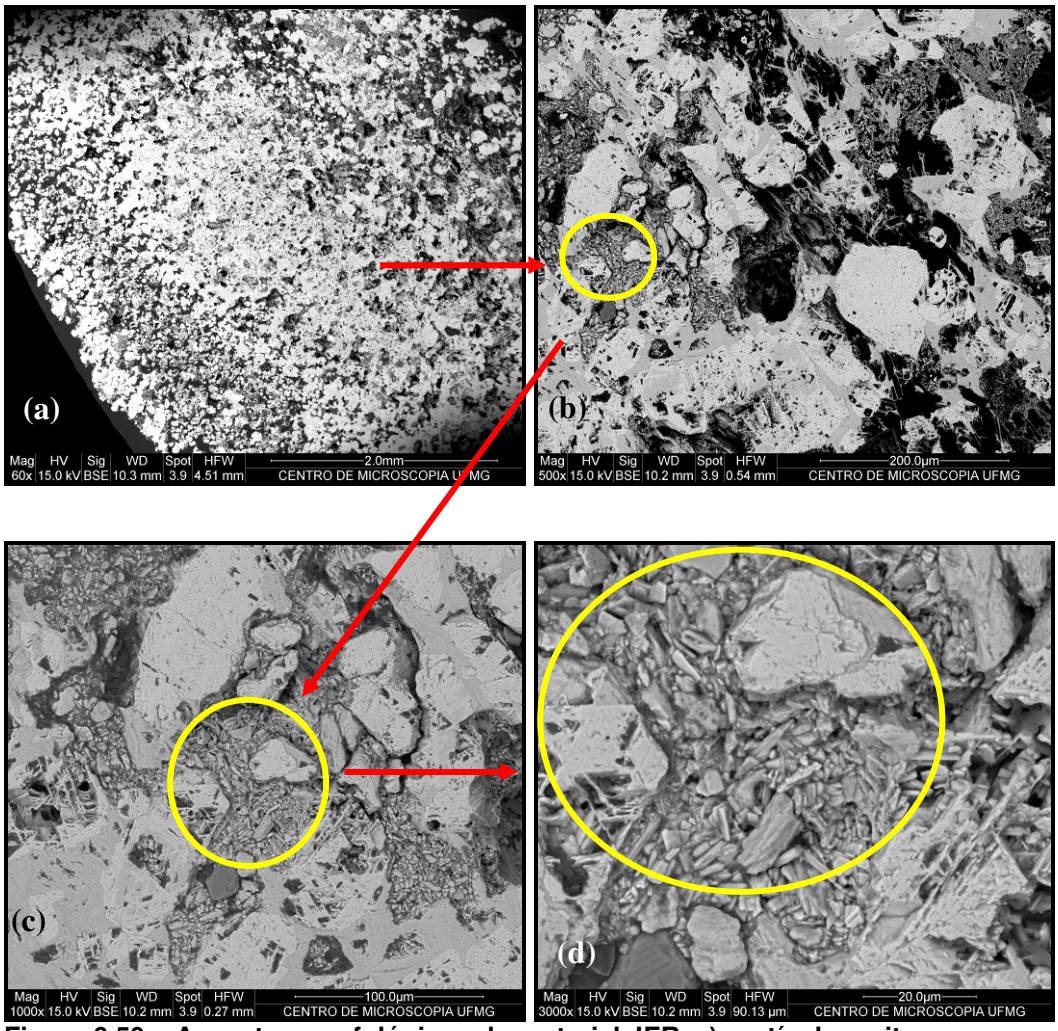


Figura 6.50 – Aspectos morfológicos do material. IER. a) partícula muito porosa composta de hematita e goethita; b, c, d) detalhe com área microporosa composta por minerais de ferro
Fonte: O autor, 2015.

Um dos minerais mais abundantes no rejeito de *sinter feed* é a goethita, constituída por óxido de ferro hidroxilado, que ocorre associada ao quartzo, podendo apresentar inclusões de hematita, gibsita ou caulinita. Apresenta clivagem, estrias e formas fibrosas, maciças, radiais, estalactíticas, tem dureza de 5–5,5 na escala Mohs e densidade relativa que varia de 3,3 a 4,3. Observa-se comum também, em função de intemperismo de minerais de ferro, a ocorrência da goethita terrosa de cor marrom-alaranjada ou ocre. Esta apresenta dureza de 4–5,5 e densidade relativa que varia de

2,7 a 4,3, considerável volume de poros e em consequência mais friável que a goethita compacta, de acordo com SANTOS e BRANDÃO (2003) e SANTOS, BRANDÃO e SAMPAIO (2005).

Os elementos mais característicos detectados na microanálise por dispersão de energia (EDS) estão destacados por suas raias nos respectivos espectrogramas.

6.3.13. Informações sobre os cimentos utilizados

Nas Figuras 6.51 e 6.52 são apresentadas informações sobre os cimentos utilizados nesta pesquisa. Tratam-se das respectivas curvas de Abrams fornecidas pelos fabricantes, a partir das quais foram definidos os parâmetros de dosagem dos concretos, resistência aos 28 dias (f_{c28}) e o necessário fator água-cimento (a/c).

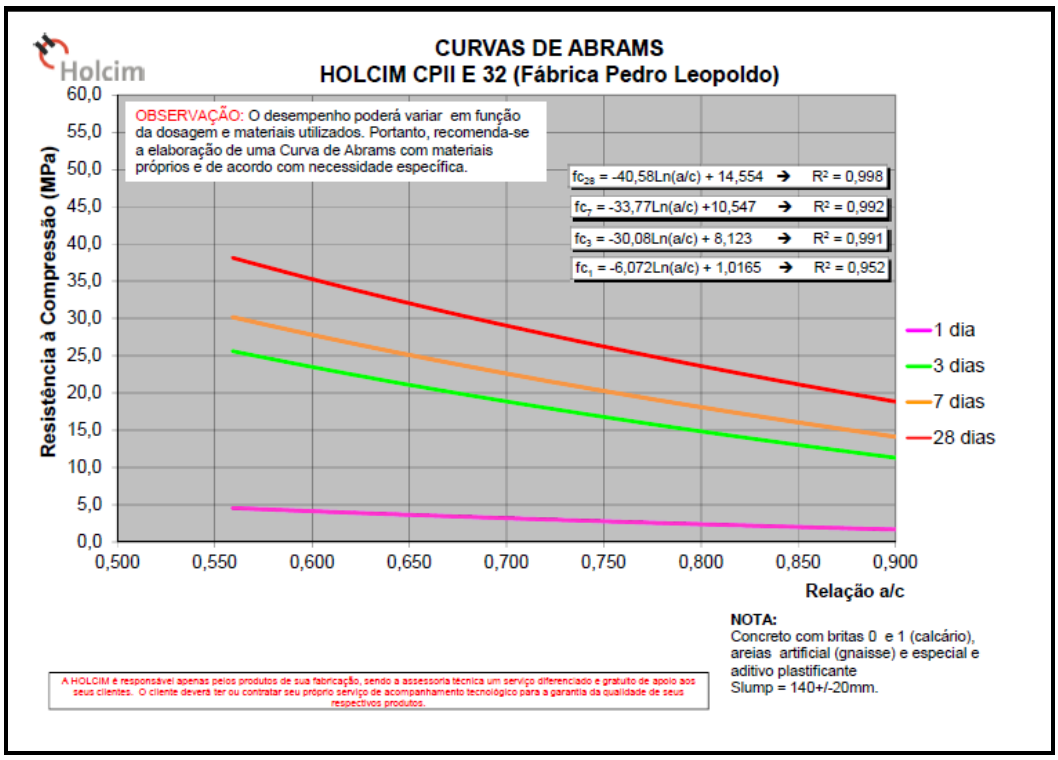


Figura 6.51 – Curva de Abrams do cimento Holcim CP II – E 32
Fonte: Holcim, 2015.

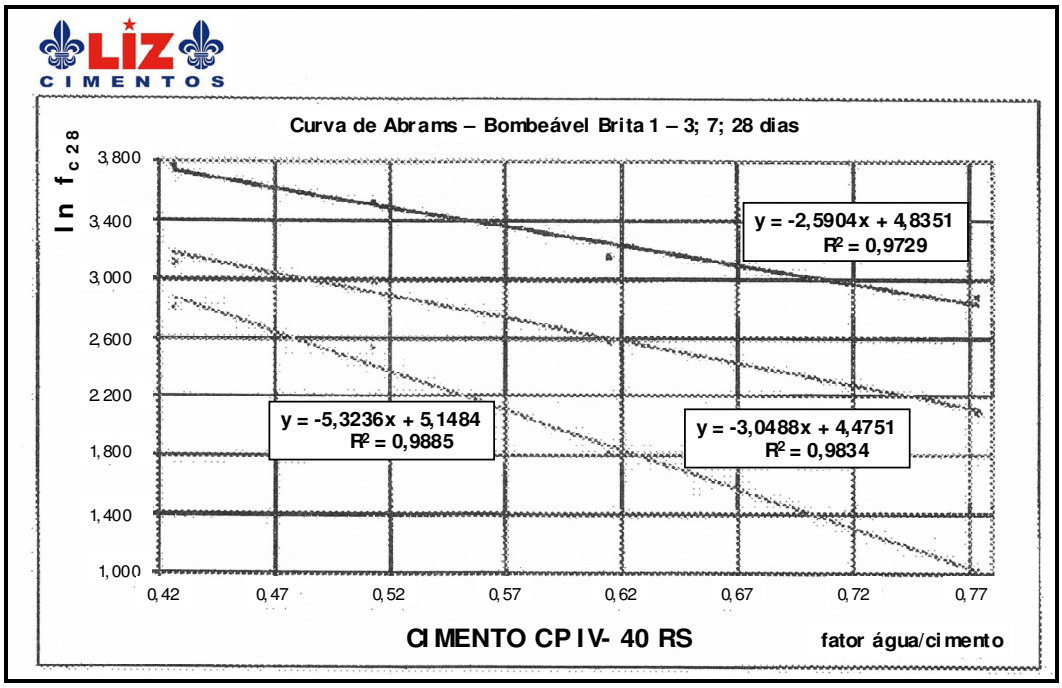


Figura 6.52 – Curva de Abrams do cimento Liz CP IV – 40 RS Super
Fonte: Liz Cimentos, 2015.

Finalizada a fase de caracterização dos materiais e suas respectivas análises, o próximo capítulo se detém efetivamente nos ensaios comparativos da pesquisa, cumprindo o estabelecido nos objetivos.

7 RESULTADOS E COMENTÁRIOS - ENSAIOS COMPARATIVOS

A segunda etapa da pesquisa teve seu início com o preparo dos traços das argamassas e dos concretos, a moldagem dos respectivos corpos de prova para os ensaios físicos estabelecidos, bem como a extração de amostras adequadas em tamanho e quantidades necessárias às análises de microscopia de varredura de elétrons (MEV) e aos ensaios de espectrometria por dispersão de energia (EDS).

Os ensaios físicos desenvolvidos com as argamassas inicialmente tiveram, ainda, o objetivo de observar principalmente seu comportamento no estado fresco, cada uma delas com a totalidade do agregado empregado, evidenciando informações importantes para instruir parâmetros de dosagem para a fase da produção dos concretos.

7.1. Ensaios comparativos com as argamassas

Para os ensaios comparativos com as argamassas estabeleceu-se como referência uma argamassa preparada com a areia normal do IPT em granulometria igual à do rejeito em estudo. Nesta fase o cimento utilizado foi o CP II - E 32 produzido pela Holcim.

Foi procedido ao ensaio granulométrico do rejeito e a partir das porcentagens retidas nas peneiras da série normal foi montada idêntica mescla com as frações da areia normal do IPT. Para as frações maiores que 2,4mm foi necessária coleta excepcional nas instalações de produção do IPT, em São Paulo, em sua planta de produção e beneficiamento da areia normal, a qual foi transportada para o Laboratório de Concreto do DEMC/UFMG em Belo Horizonte, onde foram constituídas por peneiramento as frações maiores necessárias. Para a fração de fundo, material menor que 0,15mm, foi procedida a necessária moagem em moinho de barras a partir da fração retida na peneira de malha 0,15mm (Figuras 7.53 e 7.54).



Figura 7.53 – Ilustração da granulometria do rejeito para estabelecimento do percentual das respectivas frações



Figura 7.54 – Ilustração das frações da areia normal para montagem de granulometria idêntica à do rejeito

Fonte: O autor, 2015.

Como se tratava de materiais com relativa diferença em suas massas específicas, foi necessário estabelecer o critério de traços de mesmos volumes, o que foi obtido por meio da consideração de suas massas aparentes. A areia normal do IPT apresentou massa aparente de 1,61kg/dm^3, enquanto que o rejeito apresentou 1,65kg/dm^3 e o cimento 1,297kg/dm^3, valores com os quais se procedeu ao respectivo ajuste nas pesagens, estabelecendo-se volumes iguais de seus materiais.

Como critério para a quantificação dos pesos iniciais dos materiais nessas argamassas foi utilizada uma adaptação dos princípios da norma NBR 7221 no tocante ao proporcionamento dos mesmos e da água (*traço unitário em peso = 1 : 4, com fator água/cimento = 0,60*).

Face à condição de umidade da areia normal do IPT (fornecida seca), a mesma condição foi utilizada em relação ao rejeito.

Com os materiais assim preparados foram processadas as duas argamassas em argamassadeira elétrica, com os seguintes traços, aos quais designamos **1º lote das argamassas**:

Argamassa de referência com areia normal do IPT:

- Areia normal do IPT: 9.367g = 5,818 litros
- Cimento CP II E - 32:1.919g = 1,480 litros
- Água: fator a/c = 0,60

Argamassa com o rejeito de *sinter feed* em estudo:

- Rejeito de *sinter feed* .....9.600g = 5,818 litros
- Cimento CP II E – 32 ..... 1.919g = 1,480 litros
- Água ..... fator a/c = 0,60

A primeira argamassa preparada foi a produzida com a areia normal do IPT, que apresentou boa plasticidade e com a qual foram moldados corpos de prova de Ø 5 x 10 cm, para rompimento à compressão axial simples aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade.

A segunda argamassa preparada foi produzida com o rejeito em estudo, recebendo o mesmo tratamento da argamassa anterior.

As Figuras 7.55 e 7.56 ilustram a fase das moldagens dos corpos de prova para ambas as argamassas descritas. Depois de 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desformados e conduzidos à câmara úmida por um período de 7 dias, de lá retirados e continuada sua cura em atmosfera natural no ambiente interno do laboratório, protegidos contra o sol, correntes de vento e outros condicionantes/agentes indesejados. Desse 1º lote de argamassas foram moldados os corpos de prova Ø 5x10 cm para o rompimento à compressão simples aos 3, 7, 14 e 28 dias.



Figura 7.55 – Fase da moldagem dos corpos de prova das argamassas



Figura 7.56 – Corpos de prova das argamassas moldados e enformados

Fonte: O autor, 2015.

Neste ponto uma sensível diferença foi observada. Enquanto a argamassa com a areia normal do IPT apresentou boa plasticidade, boa moldabilidade, propiciando corpos de prova de aspecto normal e superfície lisa, regular, a argamassa produzida com o

rejeito de *sinter feed,* já em sua mistura, absorveu de forma acelerada a água adicionada, proporcionando reduzidas plasticidade e moldabilidade e, ao contrário da primeira, propiciou corpos de prova de superfície irregular, não lisa, apresentando muitos orifícios. A Figura 7.57 ilustra este registro.



Figura 7.57 – Corpos de prova Ø 5x10 cm do 1º lote de argamassas
Nota: argamassa com areia normal do IPT (esq.); argamassa com rejeito (dir.)
Fonte: O autor, 2015.

Esta ocorrência suscitou inferir-se ser compatível com a condição de porosidade referenciadas nos Capítulos 1 e 4 desta tese e constituiu um dos fatores que '*instigaram o avanço desta pesquisa, especialmente na interface agregado/pasta de cimento'*, como anteriormente referido.

A partir dessa constatação entendeu-se ser conveniente avaliar tal ocorrência e refazer tais argamassas, tendo como princípio a obtenção da argamassa com o rejeito, apresentando boa plasticidade, moldabilidade e propiciando corpos de prova de aspecto normal e superfície lisa.

Assim, com os mesmos materiais e em idênticas condições, foram confeccionados novos traços de argamassas, porém iniciando-se as misturas pela argamassa que continha o rejeito e fornecendo-lhe água até que atingisse a condição adequada requerida. Uma vez obtida essa condição desejada, o mesmo procedimento foi conduzido com a argamassa contendo a areia normal do IPT e avaliadas as respectivas consequências.

Assim designou-se de **2º lote das argamassas** e os traços constituíram-se de:

Argamassa com o rejeito de *sinter feed* em estudo:

- Rejeito de *sinter* feed .....9.600g = 5,818 litros
- Cimento CP II E – 32.....1.919g = 1,480 litros
- Água.....1.551g = 1,551 litros

Argamassa de referência com areia normal do IPT:

- Areia Normal do IPT .....9,367g = 5,818 litros
- Cimento CP II E – 32.....1.919g = 1,480 litros
- Água.....1.551g = 1,551 litros

Desta feita foi constatado o que de alguma forma já seria esperado: ao serem obtidas as boas condições de plasticidade na argamassa com o rejeito de *sinter feed*, com um acréscimo de 400ml de água, correspondente a um aumento do fator a/c em 34,7% (que se mostrou necessário), consequentemente se obteve na argamassa com a areia normal uma plasticidade excessiva, em condição acentuadamente mais fluida. A Figura 7.58 ilustra a aparência dos novos corpos de prova nesta condição. Percebeu-se, ainda, que um percentual de aumento da água um pouco mais elevado poderia ainda ter sido assumido, conduzindo à obtenção de uma superfície mais regular do corpo de prova contendo o rejeito.



Figura 7.58 – Corpos de prova Ø 5x10 cm do 2º lote de argamassas
Nota: argamassa com rejeito (esq.); argamassa com areia normal do IPT (dir.).
Fonte: O autor, 2015.

Deste 2º lote de argamassas foram também moldados os corpos de prova Ø 5x10cm para o rompimento à compressão simples aos 3, 7, 14 e 28 dias, além de extraída e

preparada de cada argamassa um do corpo de prova para, após a idade de 28 dias, constituir a amostra para o ensaio comparativo de microscopia eletrônica (MEV).

7.1.1. Ensaios comparativos de resistência à compressão simples das argamassas

A Tabela 7.23 apresenta os valores dos ensaios simples de resistência à compressão obtidos nas duas argamassas (dois lotes executados).

Tabela 7.23 – Comparativo de resistência à compressão das argamassas (MPa) CP II-E32

COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS (MPa) - CP II E - 32									
LOTES / IDADES / ARGAMASSAS		1° LOTE ARGAMASSA (a/c=0,60)				2° LOTE ARGAMASSA (a/c=0,80)			
		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
CIMENTO E AREIA NORMAL (*na granulometria do rejeito*)	cp 1	17,02	19,23	29,72	36,88	9,25	16,68	18,69	21,61
	cp 2	19,46	24,26	22,11	27,01	11,17	15,96	21,63	23,30
	cp3	13,15	18,00	26,90	32,75	9,82	13,11	17,41	19,17
	cp4	15,40	21,71	31,42	38,37	12,18	14,75	16,30	24,78
	média	**16,26**	**20,80**	**27,54**	**33,75**	**10,61**	**15,13**	**18,51**	**22,22**
CIMENTO E REJEITO	cp 1	12,17	15,82	16,62	19,77	10,18	13,30	16,03	19,95
	cp 2	9,76	13,40	19,46	18,75	9,55	14,58	16,17	21,12
	cp3	10,21	13,01	15,85	19,52	11,53	16,73	17,40	19,35
	cp4	9,44	12,82	18,66	17,31	13,13	17,01	18,20	20,77
	média	**10,40**	**13,76**	**17,65**	**18,84**	**11,10**	**15,41**	**16,95**	**20,30**

Fonte: O autor, 2015.

7.1.2. Ensaios comparativos de consistência das argamassas

Cumprindo o que recomendou COUTINHO (1988), citado no Capítulo 4 desta tese, impunha-se verificar as possíveis diferenças de comportamento da argamassa produzida com o rejeito de minério, quando se cuidasse de produzir primeiro a mistura água + cimento estabelecendo uma suspensão coloidal, menos suscetível à absorção tão intensa como verificado no primeiro lote para, posteriormente, adicionar-se o agregado, comparativamente, com a adição do cimento após a mistura agregado + água.

Para tanto, com base no que instrui a Norma Brasileira NBR 13276, cuidou-se de verificar o índice de consistência por meio do *flow table test* em quatro procedimentos diferentes na argamassa produzida com o rejeito. As quatro misturas continham 400g de cimento e 1.600g do rejeito. O fator a/c foi de 0,6, ou seja, 240ml de água e aqui se optou por empregar o minério em sua condição natural que, embora aparentemente seco, apresentava umidade de 4,0% medida pelo *speed test* (garrafa metálica que

mede a umidade do agregado miúdo via rompimento de ampola de fino vidro contendo carbureto).

- No primeiro ensaio a ordem de alimentação e mistura na argamassadeira foi inicialmente o rejeito + água que, depois de misturados, receberam o cimento, tendo-se obtido, em ensaio conduzido de acordo com os procedimentos da Norma, um IC = 245mm;
- No segundo ensaio a ordem de alimentação e mistura na argamassadeira foi inicialmente a água + cimento que, depois de misturados, receberam o rejeito, tendo-se obtido, de acordo com os procedimentos da Norma, um IC = 265mm;

Nos dois ensaios seguintes, buscando antever uma conveniência de se melhorar a capacidade de molhação da água adicionada, por meio da redução da sua tensão superficial, para comparação com os procedimentos anteriores, optou-se por introduzir um percentual de 0,8% sobre o peso do cimento de aditivo plastificante polifuncional Mastermix BF 40, com idêntica redução da água, de forma que o fator líquido/cimento fosse o mesmo, ou seja, igual a 0,60.

- No terceiro ensaio a ordem de alimentação e mistura na argamassadeira foi inicialmente a água + aditivo + minério que, depois de misturados, receberam o cimento, tendo-se obtido, de acordo com os procedimentos da Norma, um IC = 285mm;
- No quarto ensaio a ordem de alimentação e mistura na argamassadeira foi inicialmente a água + aditivo + cimento que, depois de misturados, receberam o minério, tendo-se obtido, de acordo com os procedimentos da Norma, um IC = 305mm.

A Figura 7.59 ilustra a fase da execução dos ensaios anteriores.



Figura 7.59 – Etapa de ensaio do índice de consistência da argamassa com rejeito
Fonte: O autor, 2015.

Com as observações dos procedimentos anteriores, pode-se estabelecer um entendimento preliminar de que, na fase dos concretos, seria adequado o emprego de aditivo e atender a uma ordem mais adequada conveniente, ou seja, a de introduzir o rejeito na mistura em último lugar.

7.1.3. Estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons nas amostras dos corpos de prova do 2º lote das argamassas

Do total de argamassas que integraram a pesquisa, foram separados 2 corpos de prova de Ø 5 x 10cm, um de cada tipo de agregado do 2º lote de argamassas, os quais apresentaram um aspecto e morfologia mais regulares. Posteriormente foram serrados transversalmente para um preparo final, tendo em vista as dimensões da mesa porta-amostra do MEV. As Figuras 7.60 e 7.61 apresentam uma visão das amostras em seu primeiro corte.



Figura 7.60 – Amostra serrada de CP moldado de argamassa com areia normal do IPT



Figura 7.61 – Amostra serrada de CP moldado de argamassa com o rejeito

Fonte: O autor, 2015.

Em seguida, essas amostras foram recortadas utilizando-se a serra de corte de disco South-Bay, modelo M-650 (Figura 7.62), que utiliza um disco de corte diamantado extremamente fino, nos laboratórios do Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG, dotando-as de dimensões compatíveis com o porta-amostras do MEV. Após o corte, as amostras apresentaram a geometria de lado de, aproximadamente, 1,5cm, e espessura de 1,0cm (Figura 7.63).

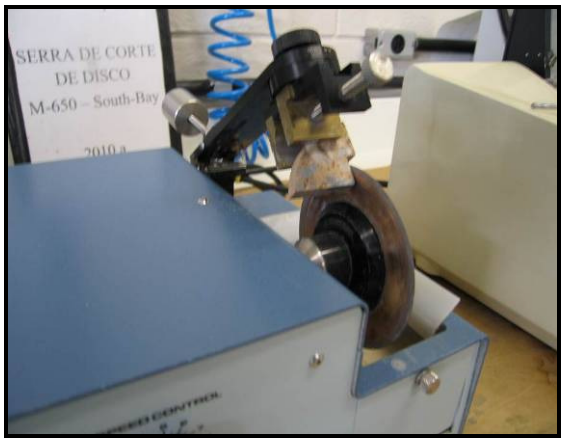


Figura 7.62 – Serra de corte de disco para preparo de amostras de pequena dimensão



Figura 7.63 – Amostra das argamassas prontas para a metalização e ensaio de microscopia eletrônica

Fonte: O autor, 2015.

Essas amostras foram metalizadas a ouro e submetidas a análises de microscopia de varredura de elétrons, objetivando a observação, o conhecimento e a análise (comparativas), todas relacionadas às características da interface entre o agregado e a pasta de cimento, de uma e de outra argamassa. A metalização a ouro teve o objetivo de propiciar melhor qualidade de imagens. Foi feita com a metalizadora Bal-Tec, modelo MCS-010 (Figura 7.64).



Figura 7.64 – Imagem da metalizadora das amostras para as análises do MEV
Fonte: O autor, 2015.

As Figuras 7.65 e 7.66 ilustram o aspecto final das amostras prontas para as respectivas análises e ensaios na microscopia eletrônica.



Figura 7.65 – Amostra preparada da argamassa com areia normal do IPT



Figura 7.66 – Amostra preparada da argamassa com rejeito

Fonte: O autor, 2015.

As amostras preparadas foram submetidas às análises de microscopia de varredura de elétrons (MEV) e aos ensaios de espectrometria por dispersão de energia (EDS) nas instalações do Centro de Microscopia da UFMG. Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura FEG - 200 FEI acoplado com um microanalisador EDS, o espectrômetro de raios-X por dispersão de energia (Figura 7.67).

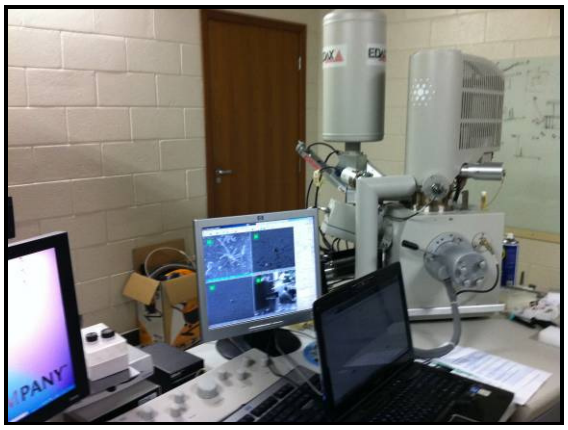


Figura 7.67 – Microscópio eletrônico de varredura FEG - Quanta 200 FEI, do CM/UFMG
Fonte: O autor, 2015.

As imagens seguintes ilustram aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados no 2º lote das argamassas, que apresentaram maior regularidade na moldagem dos respectivos corpos de prova:

É apresentada uma legenda dos principais compostos e elementos presentes nas imagens com a finalidade de identificar as respectivas formações nas várias micrografias da microestrutura das zonas de transição destacadas.

P = portlandita – $Ca(OH)_2$

C = calcita – $CaCO_3$

E = etringita – $C_6AS_3H_{32}$

CSH = silicatos de cálcio hidratados – C-S-H ou CSH

Q = quartzo – SiO_2

FE = óxidos de ferro

7.1.3.1. Argamassa com a areia normal do IPT

As Figuras 7.68 a 7.72 demonstram micrografias e espectrogramas autoexplicativos.

Por oportuno cabe pontuar algumas referências que serão apresentadas à frente:

- cristais euédricos: bem formados, com faces nítidas e bem reconhecíveis;
- cristais subédricos: mal formados, mal desenvolvidos e faces imperfeitas;

- cristais anédricos: não possui faces.

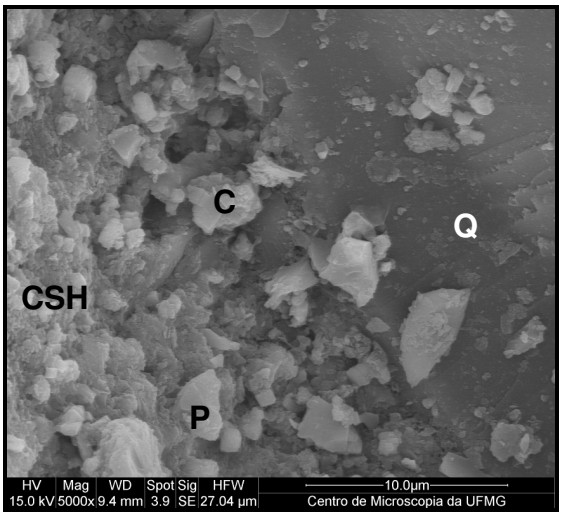


Figura 7.68 – Micrografia em amostra serrada de uma região de interface da matriz da argamassa com grão de quartzo da areia normal (indicado); IES
Legenda: CSH: silicatos de cálcio hidratados; C: calcita; Q: quartzo; P: portlandita.
Fonte: O autor, 2015.

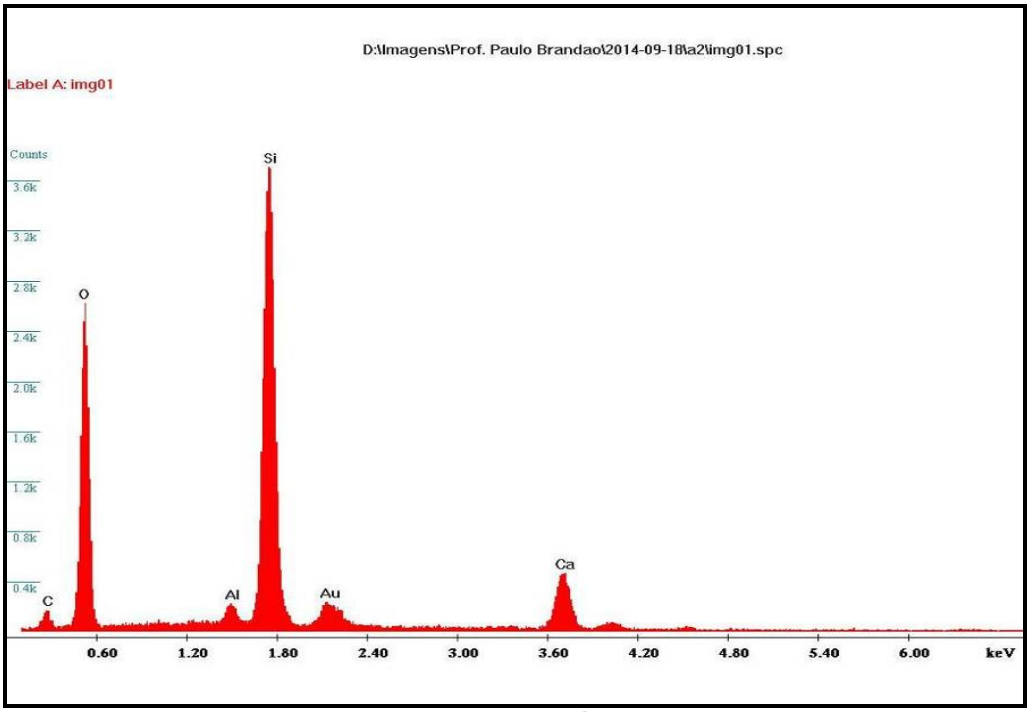


Figura 7.69 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Nota: Destaca-se a sílica do quartzo, o cálcio decorrente dos produtos da hidratação do cimento e ainda o alumínio devido à gibsita detectada na areia normal do IPT
Fonte: O autor, 2015.

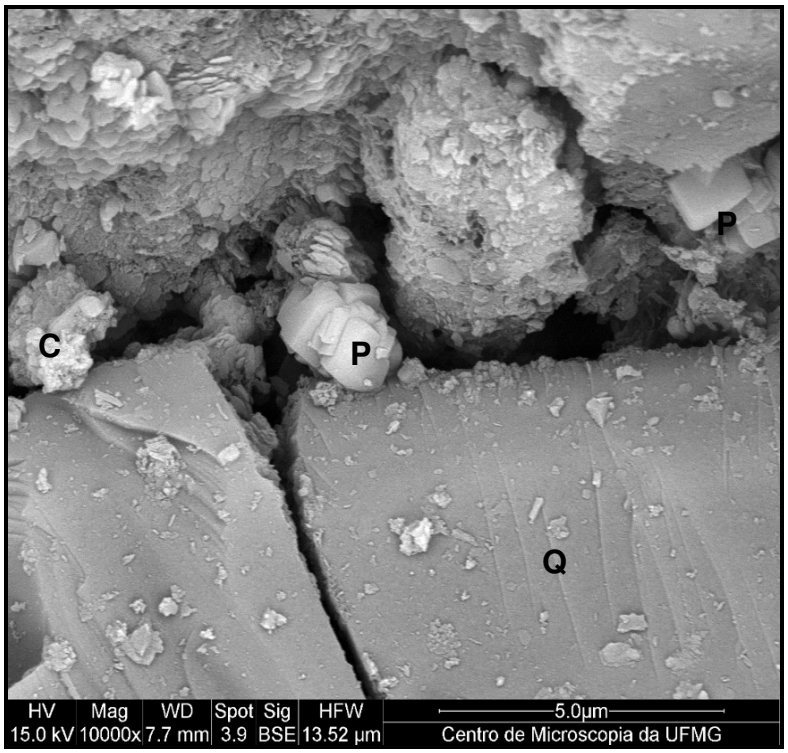


Figura 7.70 – Micrografia em amostra serrada de uma região de interface da matriz da argamassa com grão de quartzo fraturado da areia normal (indicado); IER
Legenda: C = calcita; Q = quartzo; P = portlandita ou calcita.
Fonte: O autor, 2015.

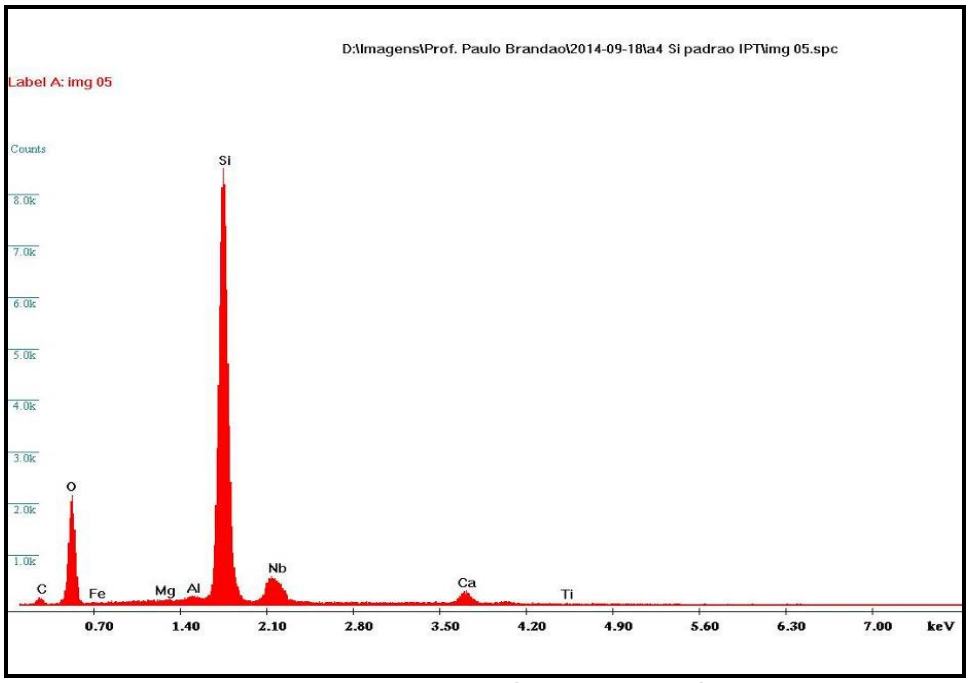


Figura 7.71 – Espectrograma da microanálise referente à micrografia anterior
Nota: Destaca-se a sílica do quartzo principalmente, o cálcio decorrente dos produtos da hidratação do cimento e ainda o alumínio devido à gibsita detectada na areia normal.
Fonte: O autor, 2015.

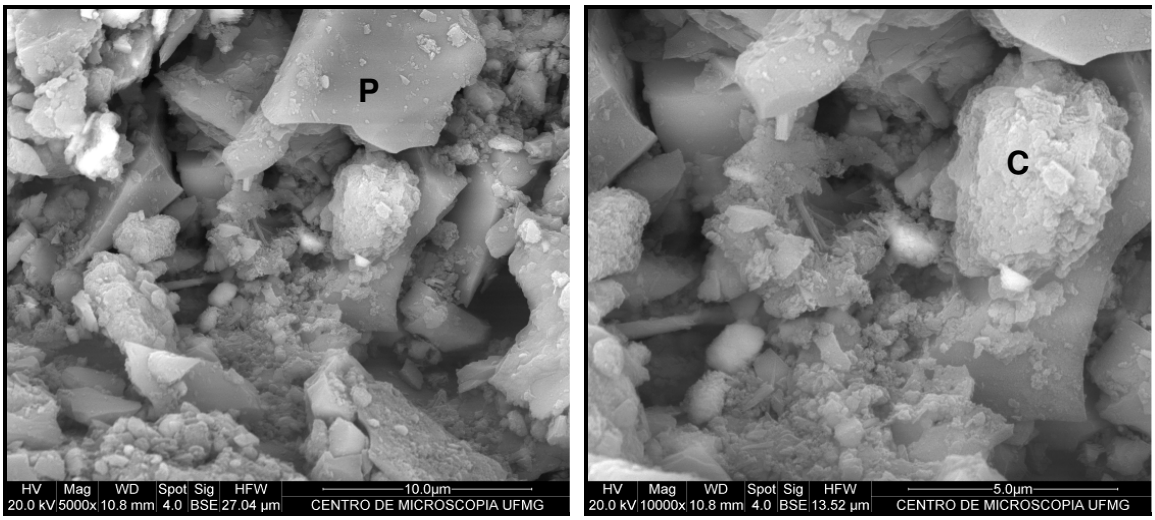


Figura 7.72 – Micrografias em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais euédricos; IER
Legenda: C = calcita; P = portlandita.
Fonte: O autor, 2015.

7.1.3.2. Argamassa com rejeito de *sinter feed*

A Figura 7.73 apresenta a micrografia em amostra serrada de região da interface com as respectivas fases indicadas.

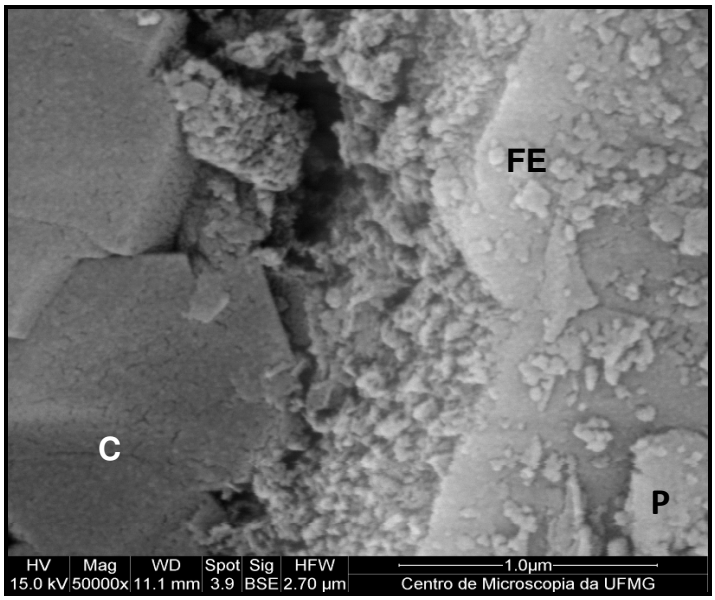


Figura 7.73 – Micrografia em amostra serrada de região da interface com respectivas fases indicadas; IER
Legenda: C = calcita; P = portlandita; FE: óxidos de ferro.
Fonte: O autor, 2015.

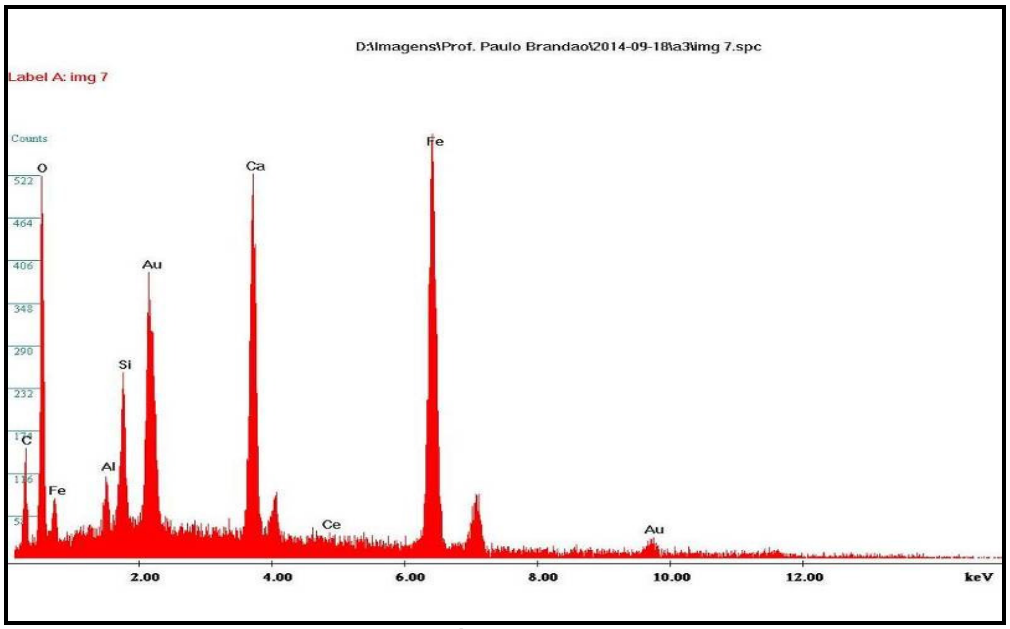


Figura 7.74 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Nota: Destaca-se a sílica do quartzo, o cálcio decorrente dos produtos da hidratação do cimento e o ferro devido à goethita, além de outras detecções minoritárias presentes na goethita e/ou matriz.
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.75 apresenta micrografia (1.200x / 5.000x) em amostra serrada de região de interface.

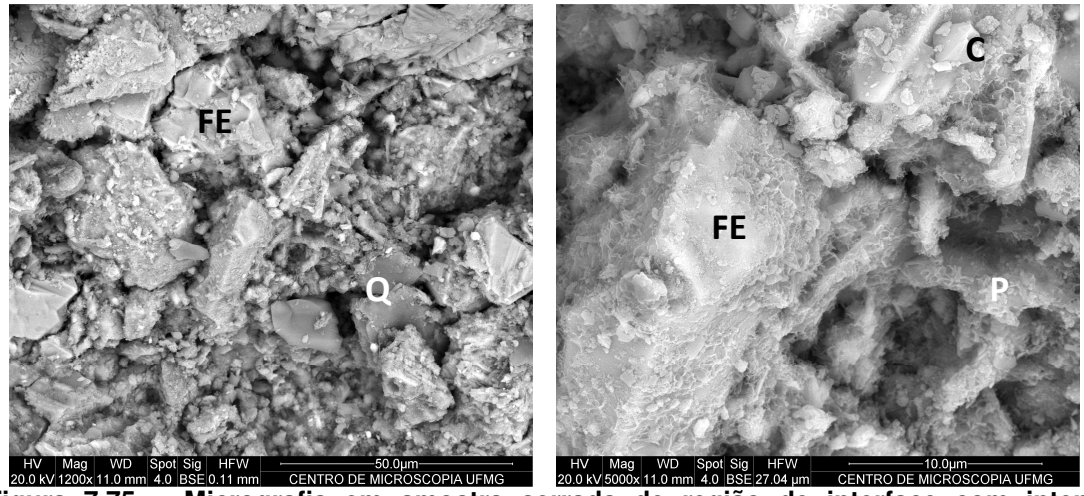


Figura 7.75 – Micrografia em amostra serrada de região de interface com intensa formação de cristais subédricos; IER
Legenda: C = calcita; Q = quartzo; P = portlandita + calcita; FE: óxidos de ferro.
Fonte: O autor, 2015.

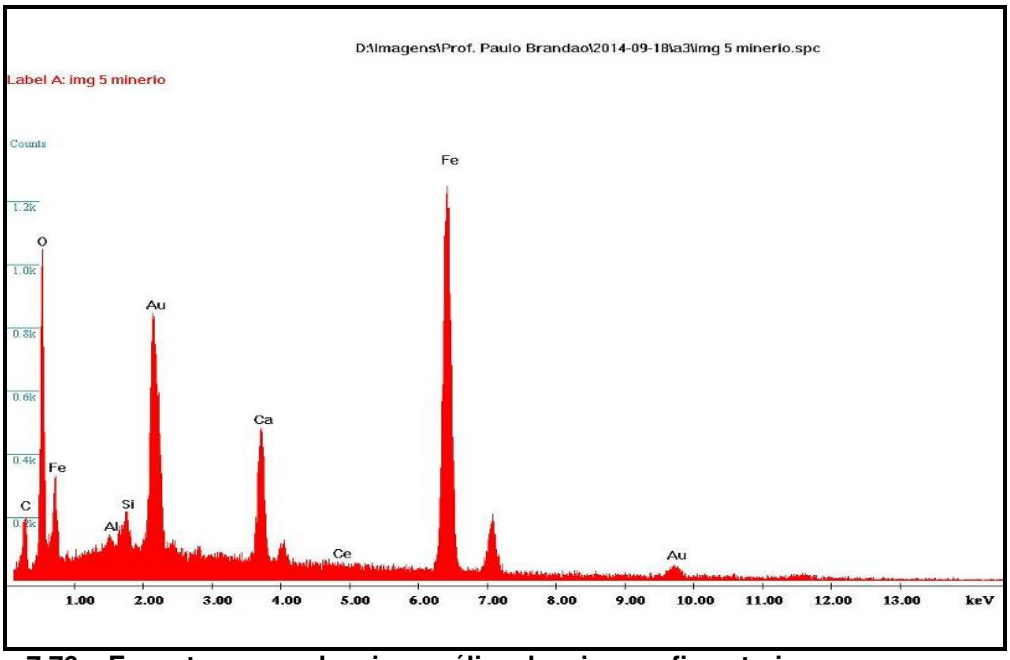


Figura 7.76 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Nota: Destaca-se a sílica do quartzo, o cálcio decorrente dos produtos da hidratação do cimento e o ferro devido à goethita. O ouro é devido ao preparo de metalização da amostra.
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.77 demonstra micrografias em amostra serrada de região de interface #1, com ampliação em 15.000x, podendo-se perceber a intensa formação de cristais. A seguir, a Figura 7.78 apresenta micrografias de interface #2.

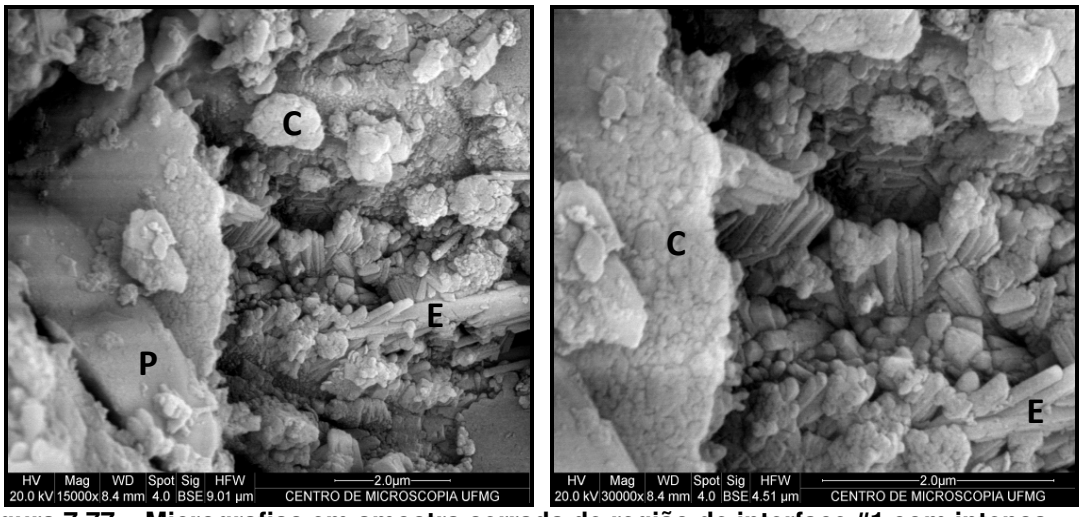


Figura 7.77 – Micrografias em amostra serrada de região de interface #1 com intensa formação de cristais euédricos; IER
Legenda: Ca = calcita; P = portlandita; E: etringita.
Fonte: O autor, 2015.

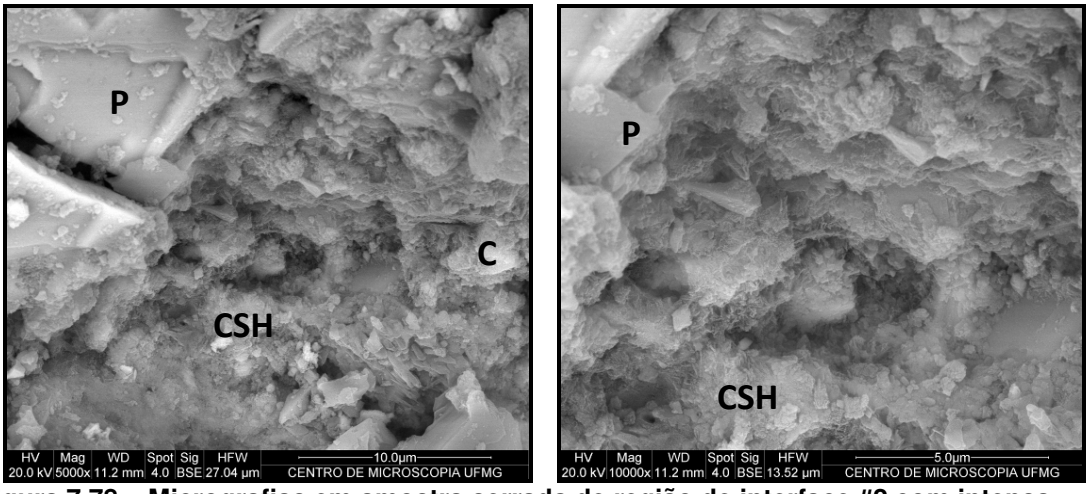


Figura 7.78 – Micrografias em amostra serrada de região de interface #2 com intensa formação de cristais subédricos; IER
Legenda: C = calcita; P = portlandita; CSH: silicatos de cálcio hidratados
Fonte: O autor, 2015.

7.2. Ensaios comparativos com os concretos

Para os ensaios comparativos com os concretos estabeleceu-se como parâmetro da análise um traço que apresentasse características de concreto plástico, com uma medida de *slump* que propiciasse inclusive o seu lançamento bombeado (14 +/- 2 cm), atendendo uma tensão de dosagem aos 28 dias de valor usual utilizado pelo mercado, no intervalo de 30 a 35MPa (considerado 32,5MPa). Este valor constitui, aproximadamente, cerca de 90% das demandas de concreto pré-misturado na região,

classe C25 a C30, informação obtida em consulta oficiosa formulada a algumas concreteiras do mercado local e com a mera finalidade de se estabelecer um parâmetro com alguma procedência.

Para o módulo de finura da mescla granulométrica estabeleceu-se como referência inicial para sua determinação a Curva II, de Bolomey, descrita no método de dosagem preconizado pelo INT, para agregados de diâmetro máximo 25mm. As Curvas de Bolomey, como se sabe, não são absolutas e não estabelecem limites fixos, sendo apenas um dos referenciais para início do estabelecimento do proporcionamento dos agregados na dosagem. Os concretos foram preparados com os materiais já descritos no Capítulo 6, a areia lavada média, as britas calcárias 0 e 1 e o aditivo plastificante polifuncional. Nesta fase os cimentos utilizados foram o CP II – E 32, produzido pela Holcim e o cimento CP IV – 40 RS, produzido pela Soeicom, escolha que teve como fator preponderante a facilidade de aquisição em qualquer comércio local.

Para a definição do fator água/cimento que atendesse as premissas anteriores foi utilizada a curva de Abrams do CP II - E 32 fornecida pelo respectivo fabricante.

Utilizando-se os critérios de dosagem do INT os dados básicos dos concretos ficaram assim definidos:

- Com o cimento CP II - E 32:
  x = 0,63
  A% = 10,5
  m = 5
  Argamassa no traço ≥ 50%
- Com o cimento CP IV - 40 RS:
  x = 0,63
  A% = 10,5
  m = 5
  Argamassa no traço ≥ 50%

Com o objetivo também de ampliar as observações foram dosados concretos respeitando o mesmo parâmetro de resistência (f_{c28} = 32,5MPa) para o cimento CP IV - 40 RS, com base em sua curva de Abrams específica, cujos dados básicos foram os descritos abaixo:

- Com o cimento CP IV-40 RS:
  x = 0,52
  A% = 10,5
  m = 4
  Argamassa no traço ≥ 50%

A Figura 7.79 corresponde a uma planilha eletrônica constituída com a finalidade de facilitar o cálculo do proporcionamento dos agregados na mescla desejada, atividade que se faz por tentativas por meio da superposição das curvas e igualdade/proximidade do módulo de finura. Nela foram lançados os respectivos valores correspondentes à mescla da curva II de Bolomey, para agregados de $Ø_{max}$ = 25mm, gerando o correspondente traçado gráfico. Nos campos da granulometria dos agregados utilizados foram lançadas as respectivas porcentagens retidas acumuladas de cada um. Atuando-se, por tentativas, na linha denominada "*% do agregado na nova mescla*", foram sendo experimentados os percentuais de cada agregado no traço de forma constituir a mescla do concreto sem o rejeito, que se aproximasse da referência de Bolomey e que melhor atendesse o parâmetro desejado de porcentagem de argamassa no traço, tendo-se chegado a um módulo de finura igual a 4,78.

ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA				
AGREGADO n°.:	1	2	3	4
MATERIAL:	Areia	Brita 0	Brita 1	Rejeito
NATUREZA:	quartzosa	calcária	calcária	ferro-quartzoso
PROCEDÊNCIA:	Fernato - Esmeraldas	Ical	Ical	Itaminas
PROPRIETÁRIO:	Dep. Sta. Rosa	Dep. Sta. Rosa	Dep. Sta. Rosa	DEMC
UTILIZAÇÃO:	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa
IMP. ORGÂNICA:				
ARG. EM TORRÕES:				
MAT. PULVERULENTO:				
COEF. DE VAZIOS:				
MOD. DE FINURA				

Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer. Curva II Bolomey		Mescla Calculada Concreto sem rej.	
	25			-		-		-	
	19			6,68		12,00		2,47	
	9,5		6,50	95,86		35,00		36,83	
	6,36	-	46,20	98,96		46,00		46,32	
	4,8	0,80	78,20	99,35		51,00		53,52	
	2,4	3,42	98,60	99,35		62,00		58,90	
	1,2	11,37	99,20	99,35		70,00		62,37	
	0,6	42,74	99,30	99,35		76,00		75,56	
	0,3	79,64	99,30	99,35		80,00		91,06	
	0,15	93,91	99,30	99,35		83,00		97,05	
	Fundo	100,00	100,00	100,00		100,00		100,00	
% do agregado na nova mescla (em peso)		42	21	37		Ø máx.	25	Ø máx.	19
						Mód. Finura	4,69	Mód. Finura	4,78

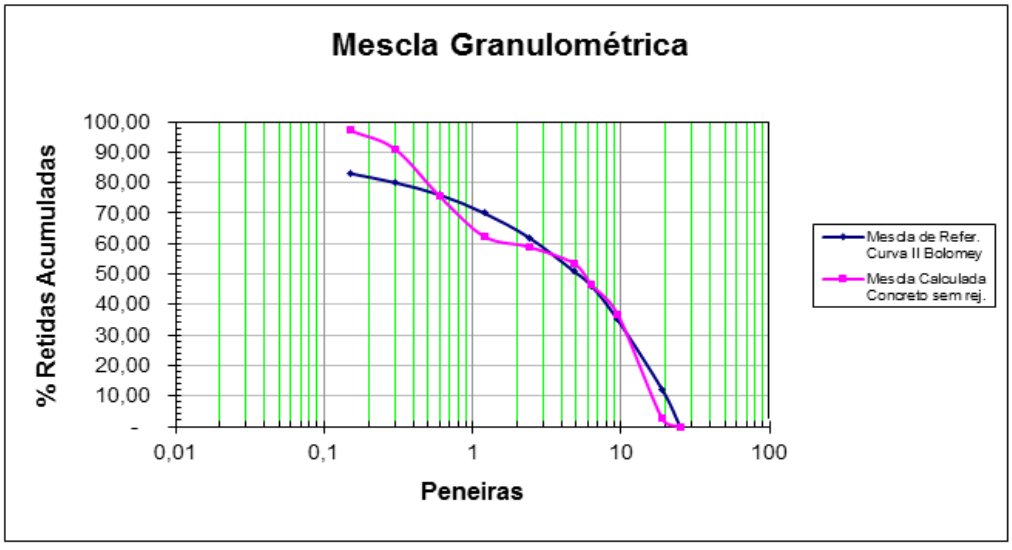


Figura 7.79 – Estabelecimento da mescla para o concreto sem emprego do rejeito
Fonte: O autor, 2015.

A curva da mescla calculada da Figura 7.79 corresponde à mescla granulométrica do concreto sem o rejeito. Na Figura 6.80 esta passou a ser a mescla de referência, com a qual se buscou constituir a mescla granulométrica do concreto com rejeito, em procedimento semelhante ao citado anteriormente. Nos campos dos percentuais de

cada agregado utilizado no traço foram experimentados valores diversos (de forma constituir a mescla do concreto com o rejeito) que se aproximassem da nova referência e que também atendessem o parâmetro desejado de argamassa no traço. Foi conseguido o módulo de finura praticamente idêntico, de 4,77, com a diferença irrelevante de 0,01 (Figura 7.80).

	ESTUDO DE MESCLA GRANULOMÉTRICA			
AGREGADO n°.:	**1**	**2**	**3**	**4**
MATERIAL:	**Areia**	**Brita 0**	**Brita 1**	**Rejeito**
NATUREZA:	quartzosa	calcária	calcária	ferro-quartzoso
PROCEDÊNCIA:	Fernato - Esmeraldas	Ical	Ical	Itaminas
PROPRIETÁRIO:	Dep. Sta. Rosa	Dep. Sta. Rosa	Dep. Sta. Rosa	DEMC
UTILIZAÇÃO:	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa	concreto / argamassa
IMP. ORGÂNICA:				
ARG. EM TORRÕES:				
MAT. PULVERULENTO:				
COEF. DE VAZIOS:				
MOD. DE FINURA				

Granulometria ABNT NBR-7211	Pen.(mm)	% Ret. Acum. [1]	% Ret. Acum. [2]	% Ret. Acum. [3]	% Ret. Acum. [4]	Mescla de Refer. Concreto s/ rej.	Mescla Calculada Concreto c/ rej.
	25					-	-
	19			6,68		2,47	2,00
	9,5		6,50	95,86		36,83	29,99
	6,36	-	46,20	98,96	-	46,32	38,47
	4,8	0,80	78,20	99,35	10,00	53,52	47,83
	2,4	3,42	98,60	99,35	40,00	58,90	61,26
	1,2	11,37	99,20	99,35	65,00	62,37	70,54
	0,6	42,74	99,30	99,35	79,00	75,56	81,35
	0,3	79,64	99,30	99,35	83,00	91,06	90,30
	0,15	93,91	99,30	99,35	85,00	97,05	93,89
	Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
% do agregado na nova mescla (em peso)		21	19	30	30	Ø máx. 19 / Mód. Finura 4,78	Ø máx. 19 / Mód. Finura 4,77

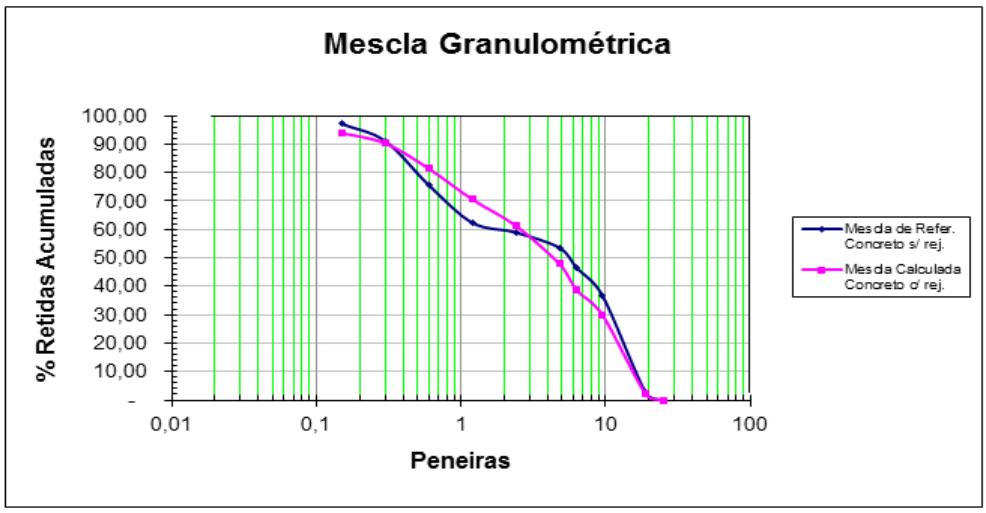


Figura 7.80 – Estabelecimento da mescla para o concreto com emprego do rejeito
Fonte: O autor, 2015.

E assim, finalmente, os traços dos concretos resultantes para os ensaios comparativos foram:

- Concreto sem rejeito: TUP = 1: 2,1: 1,05: 1,85, em cimento, areia, brita 0 e brita 1; a/c = 0,63; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado também como “traço de referência”.
- Concreto com rejeito: TUP = 1: 1,05: 0,95: 1,50: 1,50, em cimento, areia, brita 0, brita 1 e rejeito; a/c = 0,63; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado como “traço com rejeito”.

O emprego do aditivo teve o objetivo de reduzir a tensão superficial da água, dotando-a de maior capacidade de molhação face à maior área superficial do rejeito e no sentido de prevenir a ocorrência verificada na fase dos ensaios desenvolvidos exclusivamente com argamassa, citados em 7.1.

Foram produzidos dois traços de concreto com os respectivos materiais, cada um em número de etapas necessárias à produção dos corpos de prova da pesquisa. A areia utilizada apresentava, nas ocasiões das moldagens, umidade de 5% medida pelo *Speed*. No concreto com rejeito, este foi o último agregado a ser incorporado á betoneira, depois de já convenientemente misturados e homogeneizados os demais, inclusive o cimento e a água.

Em ambos os traços, a dosagem de água foi feita pausadamente e interrompida no momento em que se atingiu uma plasticidade satisfatória e dentro dos parâmetros do abatimento (*slump*) previstos. Do volume da solução água + aditivo previsto para cada traço foi possível reduzir 1,9 litros, o que correspondeu também a uma redução do percentual de aditivo para 0,61% sobre o peso do cimento, o que se justificou em decorrência da água carreada pela areia em sua umidade. Os concretos sem rejeito apresentaram *slumps* medidos no intervalo de 15 a 17cm em duas verificações por betonada, enquanto que os com rejeito apresentaram *slumps* no intervalo de 13 a 15cm, em idênticos procedimentos. Na moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram adensados em mesa vibratória Menegotti, 2 x 1, de 3 CV, 1200Kp, por um tempo de aproximadamente 20/25 segundos.

Para os concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS, com fator água/cimento = 0,52 os traços unitários em peso ficaram assim constituídos:

- Concreto sem rejeito: TUP = 1: 1,68: 0,84: 1,48, em cimento, areia, brita 0 e brita 1; a/c = 0,52; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado também como “traço de referência”.
- Concreto com rejeito: TUP = 1: 0,84: 0,76: 1,20: 1,20, em cimento, areia, brita 0, brita 1 e rejeito; a/c = 0,52; aditivo = 0,8% sobre o peso do cimento, nesta etapa nominado como “traço com rejeito”.

As Figuras 7.81 a 7.85 ilustram algumas fases desses procedimentos de laboratório.



Figura 7.81 – Fase da adição pausada da solução água + aditivo



Figura 7.82 – Medida do abatimento pelo slump test



Figura 7.83 – Adensamento dos corpos de prova dos concretos em mesa vibratória



Figura 7.84 – Conjunto parcial dos corpos de prova moldados – traço com rejeito

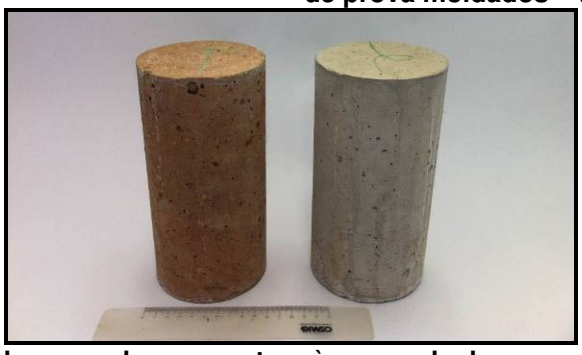


Figura 7.85 – Corpos de prova dos concretos; à esquerda do concreto com rejeito e à direita o do concreto convencional, sem rejeito

Fonte: O autor, 2015.

7.2.1. Estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons das zonas de transição – Interface pasta/agregado – concretos com fator a/c = 0,63

Para as análises comparativas das zonas de transição – interface pasta/agregado foram escolhidos aleatoriamente, dentre os concretos produzidos descritos em 6.4.1, corpos de prova Ø10 x 20cm, os quais foram seccionados transversalmente por meio de serra circular diamantada em relação ao seu eixo longitudinal, conforme Figura 7.86, preparando segmentos cilíndricos com espessura aproximada de 1cm (Figura 7.87):



Figura 7.86 – Corte transversal do corpo de prova do concreto



Figura 7.87 – Segmento cilíndrico do concreto sem rejeito

Fonte: O autor, 2015.

Essas peças foram levadas a um equipamento de corte com lâmina diamantada extremamente fina, por meio do qual foram efetuados os cortes, previamente definidos para formação das amostras a serem levadas ao microscópio. As Figuras 7.88 a 7.90 ilustram a operação.

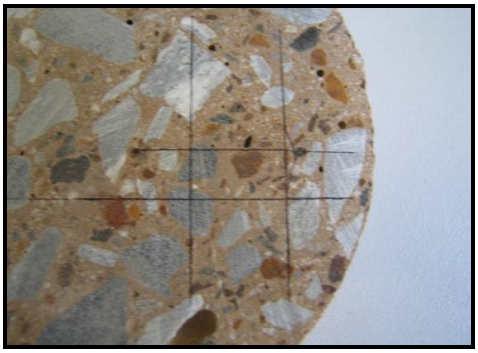


Figura 7.88 – Marcação de corte em corpo de prova do concreto com rejeito

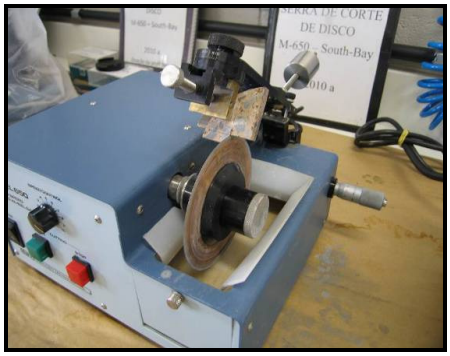


Figura 7.89 – Equipamento de serra circular diamantada em operação

Fonte: O autor, 2015.



Figura 7.90 – Peça de um segmento cilíndrico após os cortes para confecção das amostras

Fonte: O autor, 2015.

Além de amostras confeccionadas a partir de cortes nos corpos de prova foram também feitas amostras a partir de superfícies de fratura obtidas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração por compressão diametral. As Figuras 7.91 a 7.93 apresentam as amostras preparadas e que foram levadas ao microscópio.



Figura 7.91 – Amostra pronta do concreto sem rejeito, serrada, metalizada e montada no stub



Figura 7.92 – Amostra pronta do concreto com rejeito, serrada, metalizada e montada no stub

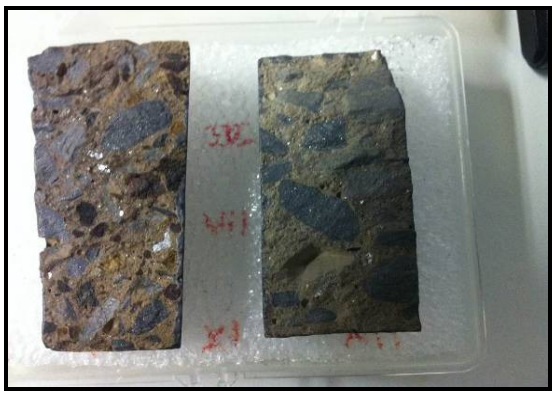


Figura 7.93 – Amostras prontas e metalizadas em carbono, obtidas em superfície de fratura nos dois concretos com cimento CP II – E 32 (com rejeito à esquerda)

Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.94 apresenta as amostras prontas e metalizadas em carbono sem rejeito e com rejeito. Ambas foram obtidas a partir da superfície serrada nos dois concretos com cimento CP IV – 40 RS.

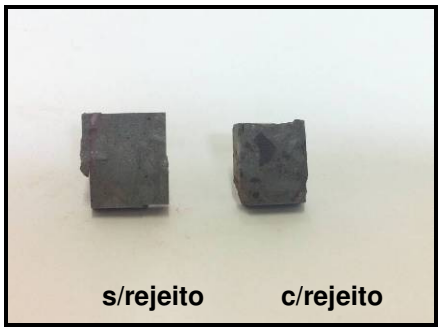


Figura 7.94 – Amostras prontas e metalizadas em carbono, obtidas de superfície serrada nos dois concretos com cimento CP IV - 40 RS
Fonte: O autor, 2015.

Os cortes necessários ao preparo das amostras deram-se sempre após a idade de 30 dias dos CP's dos concretos produzidos e suas análises em microscopia ocorreram de acordo com as disponibilidades do MEV, no Centro de Microscopia da UFMG, em idades nunca superiores aos 80 dias de idade.

Os conjuntos de imagens seguintes ilustram aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP II - E 32, **sem o rejeito de *sinter feed***:

Como anteriormente referido, é apresentada adiante uma legenda dos principais compostos e elementos presentes nas referidas imagens, com a finalidade de identificar as respectivas formações nas várias micrografias da microestrutura das zonas de transição destacadas.

P = portlandita – $Ca(OH)_2$

C = calcita – $CaCO_3$

E = etringita – $C_6AS_3H_{32}$

CSH = silicatos de cálcio hidratados – C-S-H ou CSH

Q = quartzo – SiO_2

FE = óxidos de ferro

Da mesma forma citada anteriormente com relação às argamassas, cabe referenciar aqui no tocante a:

- cristais euédricos: bem formados, com faces nítidas e bem reconhecíveis;
- cristais subédricos: mal formados, mal desenvolvidos e faces imperfeitas;
- cristais anédricos: não possui faces.

A Figura 7.95 demonstra a sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto, destacando em (d) a interface do agregado e matriz.

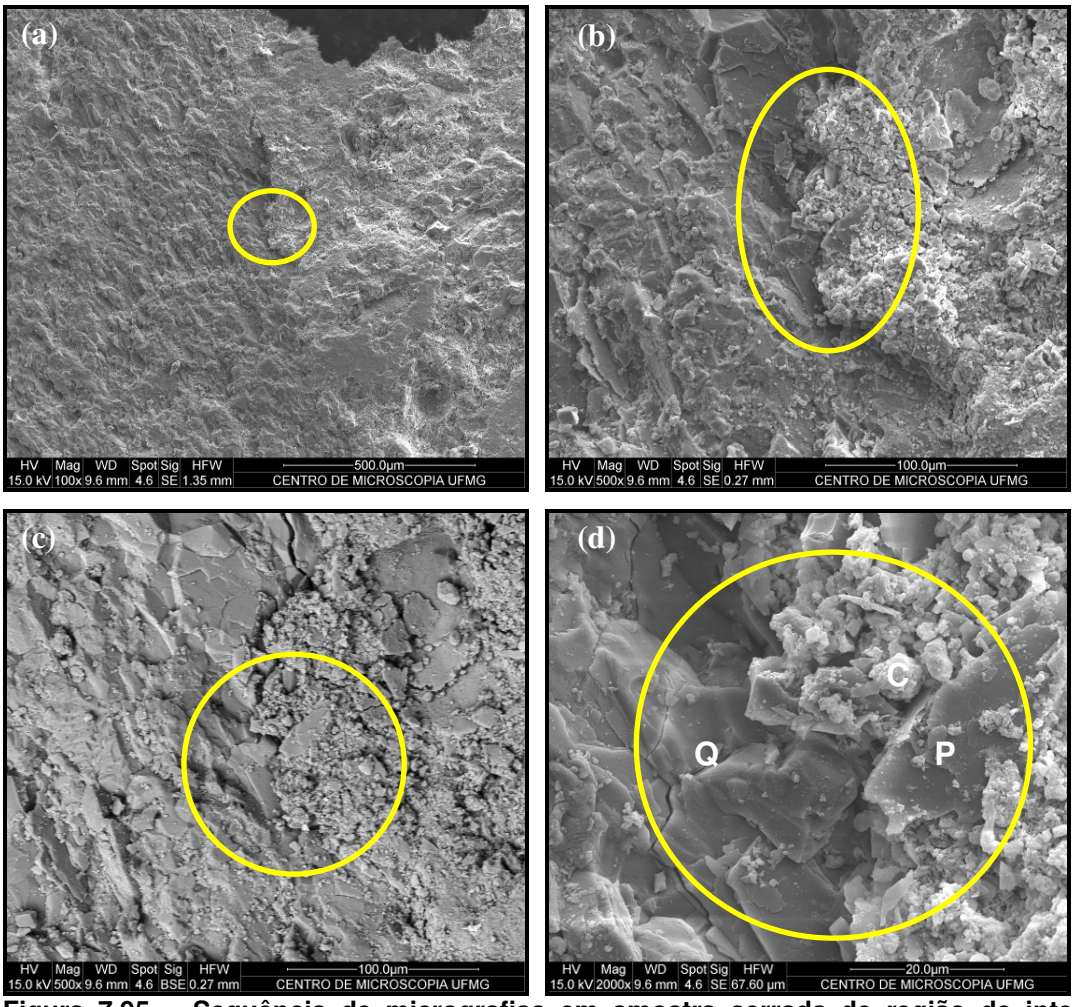


Figura 7.95 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto, destacando em (d) a interface do agregado e matriz; a, b, d = IES; c = IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.96 demonstra a sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (d), (e) e (f) detalhes da microestrutura na zona de transição.

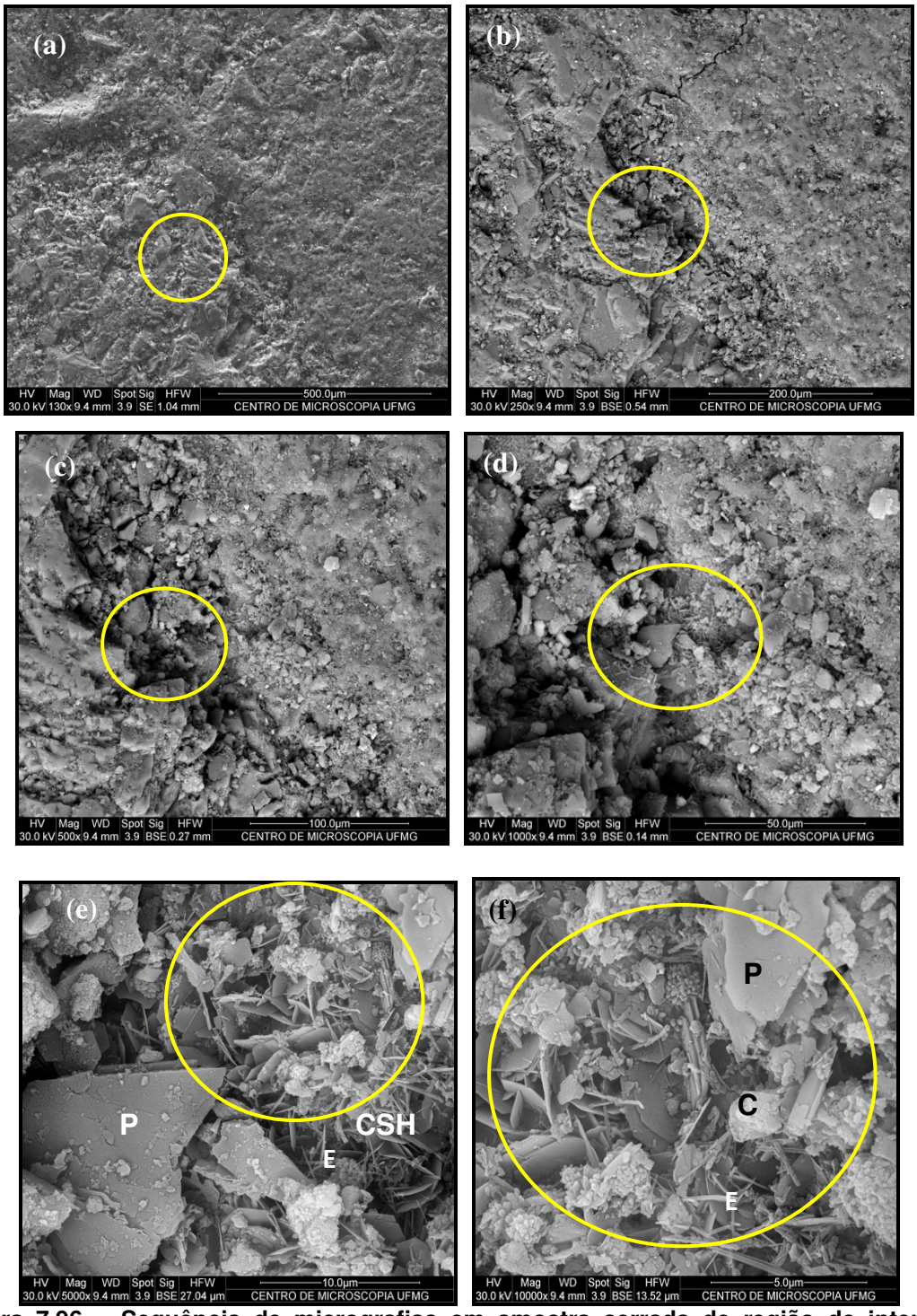


Figura 7.96 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (d), (e) e (f) detalhes da microestrutura na zona de transição; a = IES; demais = IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.97 demonstra a sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto.

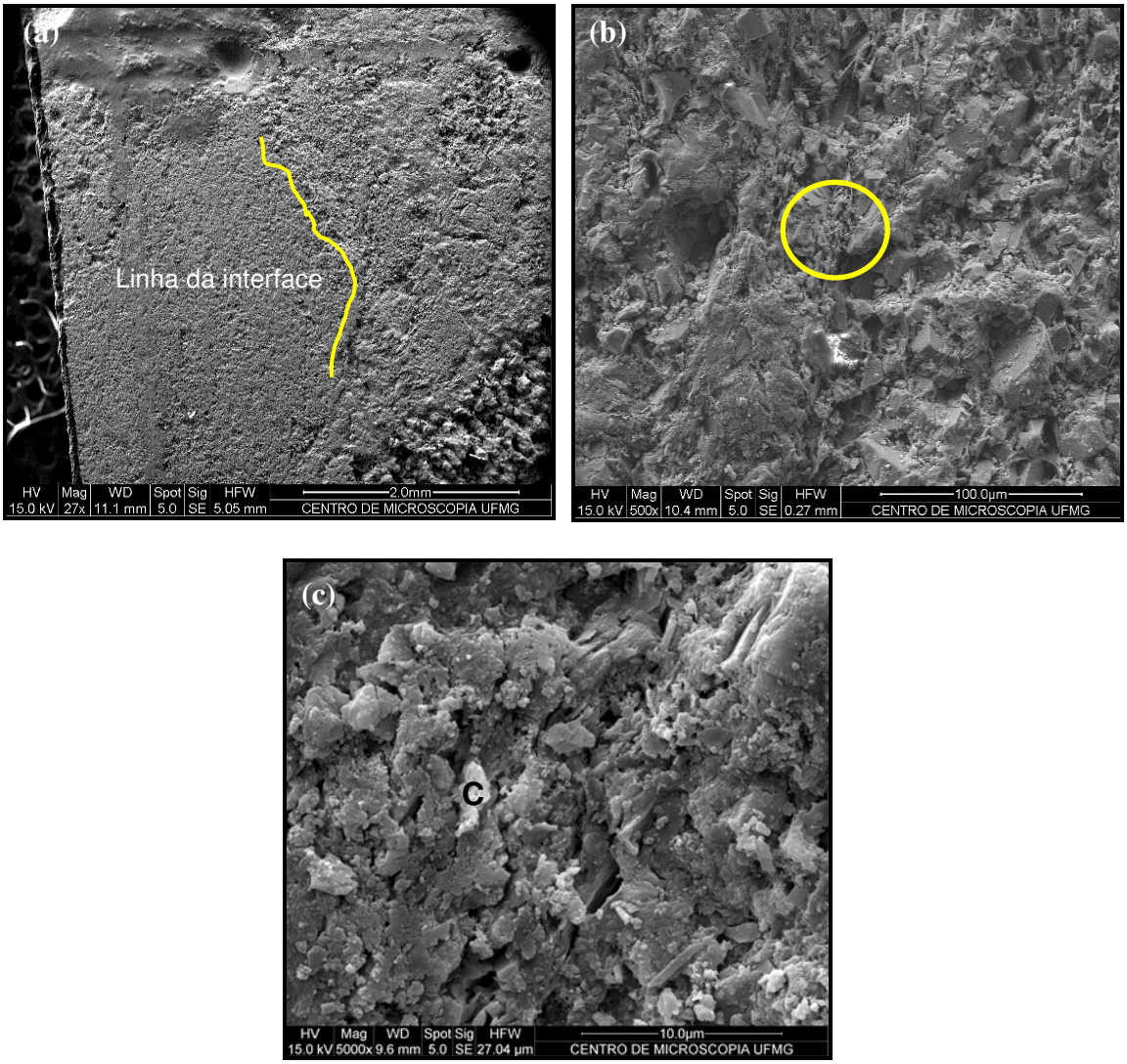


Figura 7.97 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto; IES
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.98 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

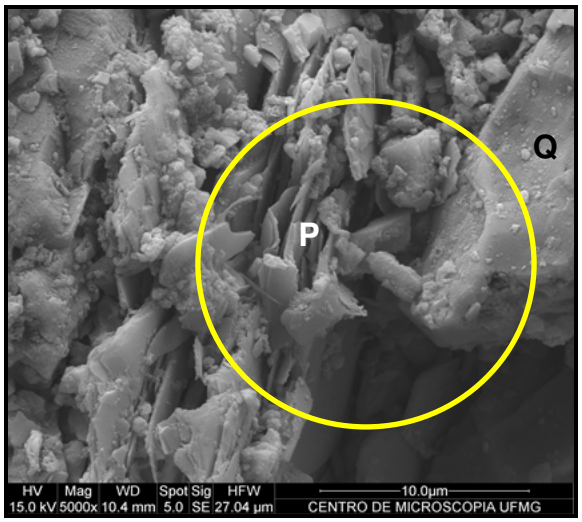


Figura 7.98 - Micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior, destacando detalhes da microestrutura da interface matriz/agregado; IES
Fonte: O autor, 2015.

Pode ser observada na Figura 7.98 microestrutura de concreto padrão, bastante compacta, com presença predominante de cristais muito pequenos, principalmente de portlandita, com sua morfologia tipicamente lamelar. A Figura 7.99 mostra espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 7.98, destacando a sílica do agregado e o cálcio dos cristais de portlandita.

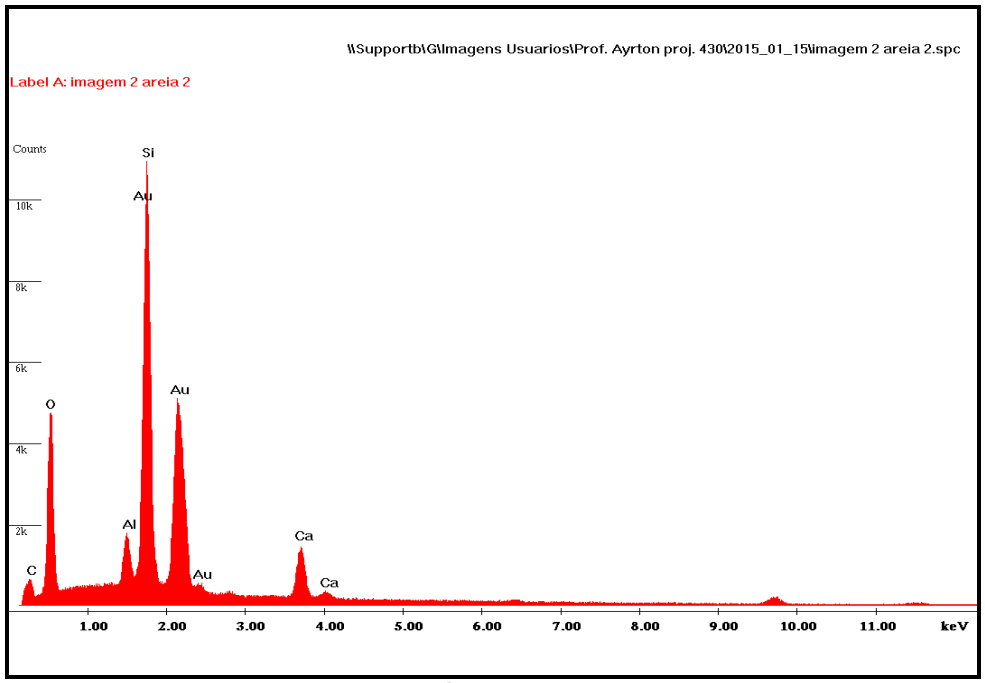


Figura 7.99 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (d) destacando a sílica do agregado e o cálcio dos cristais de portlandita
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.100 demonstra a sequência de micrografias em amostra de superfície de fratura de região de interface (ampliação 100x) obtidas em amostra do concreto sem rejeito de *sinter feed*, destacando em (c) e (d) detalhes da microestrutura na interface.

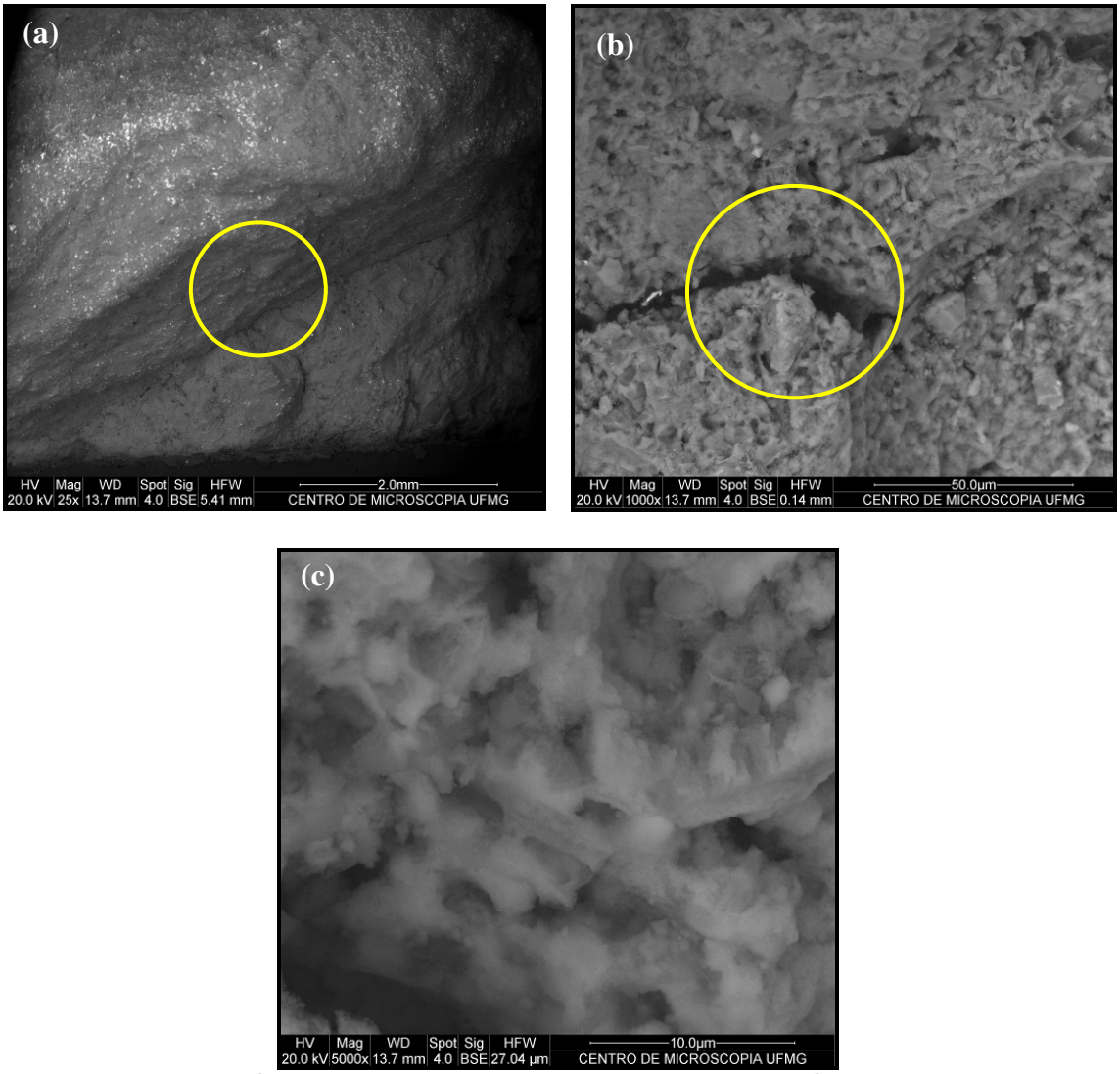


Figura 7.100 – Sequência de micrografias em amostra de superfície de fratura de região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) e (d) detalhes da microestrutura na interface; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.101 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

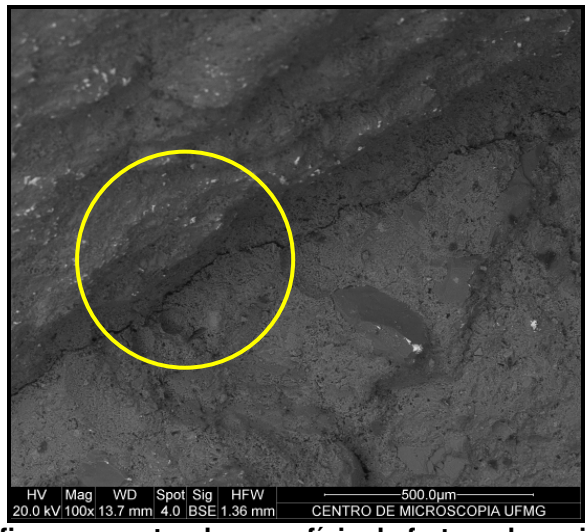


Figura 101 - Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.102 mostra o espectrograma da microanálise da micrografia da Figura anterior (concreto sem rejeito de *sinter feed*).

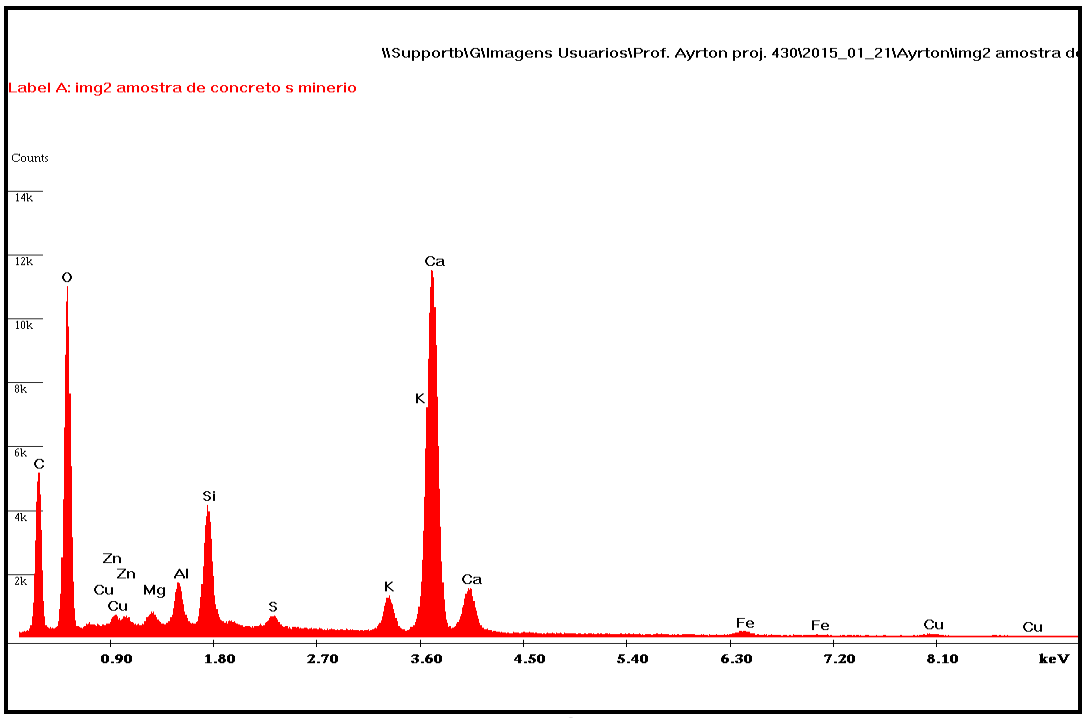


Figura 7.102 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (b)
Fonte: O autor, 2015.

Os conjuntos de imagens seguintes (Figura 7.103) constituem sequências de micrografias de regiões de interface obtidas em amostras do concreto produzidos com o cimento CP II - E 32 **com o rejeito de *sinter feed***. A seta indica grão rico em calcita.

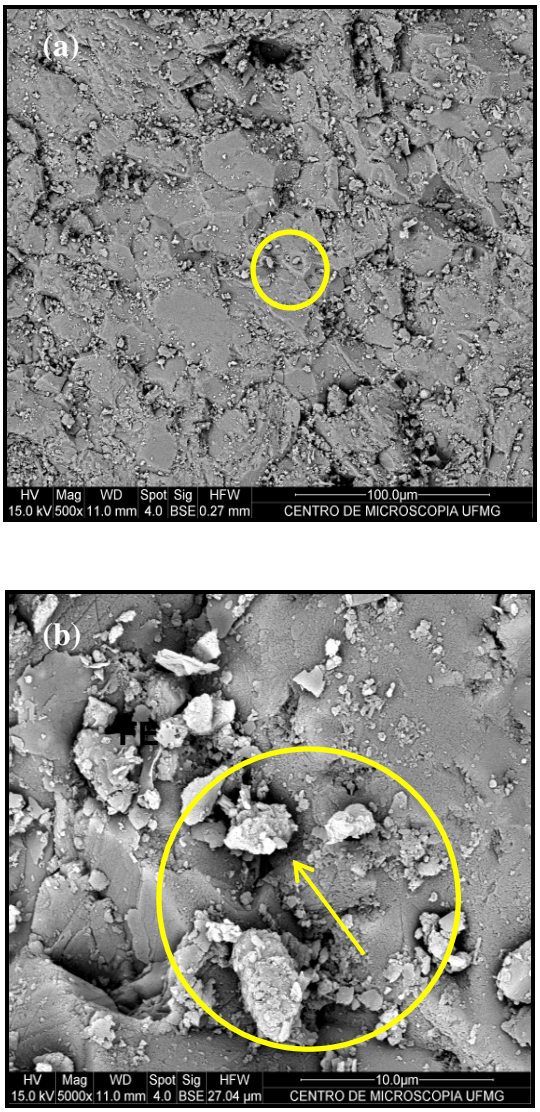


Figura 7.103 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.104 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

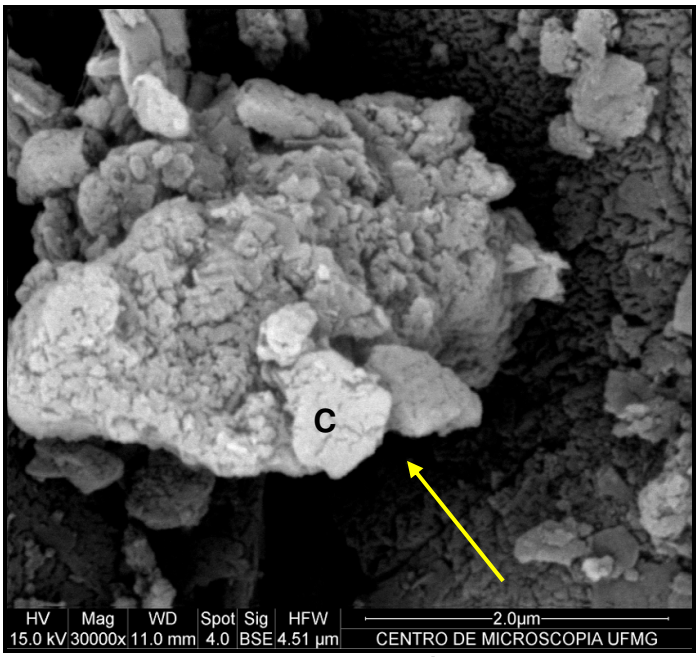


Figura 7.104 - Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.105 apresenta espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 7.104, destacando elemento de cristalização do cimento.

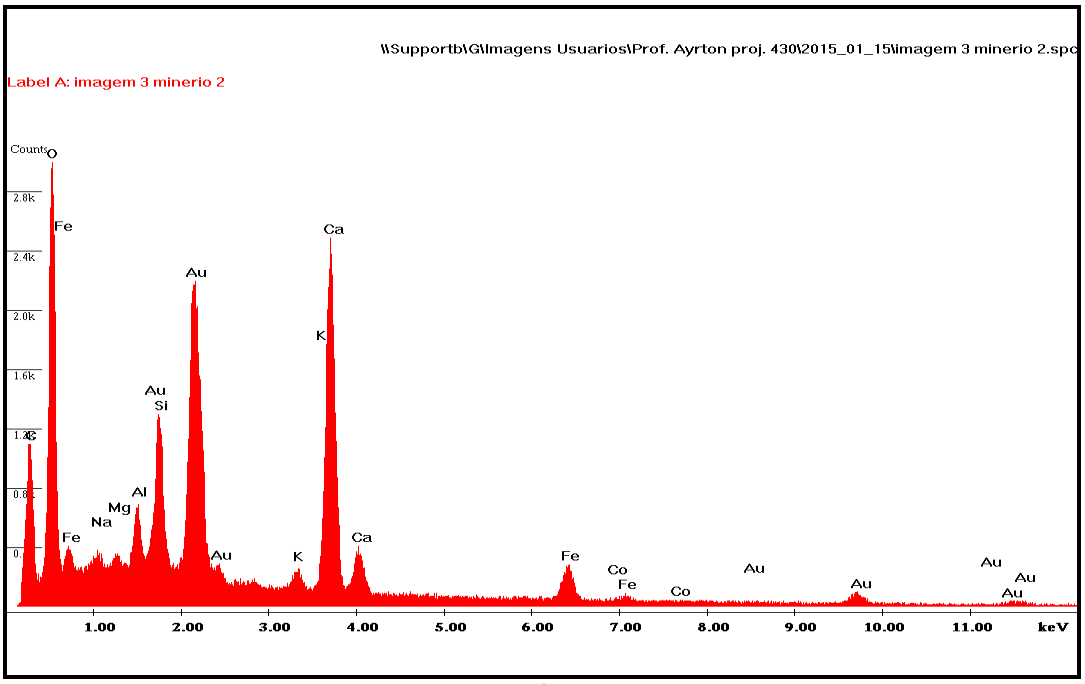


Figura 7.105 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (c) destacando elemento de cristalização do cimento
Fonte: O autor, 2015.

Em zona de transição de interface, onde existem rejeitos, foi observada a presença de carbonato de cálcio reduzidamente cristalizado quando comparado em misturas sem rejeito. O tamanho dos cristais de carbonato observado nas amostras (que contêm rejeito) permite afirmar que são de magnitude pequena, típica de estrutura cristalizada e refinada, diferentemente daqueles carbonatos precipitados nos concretos sem rejeito (Figura 7.106).

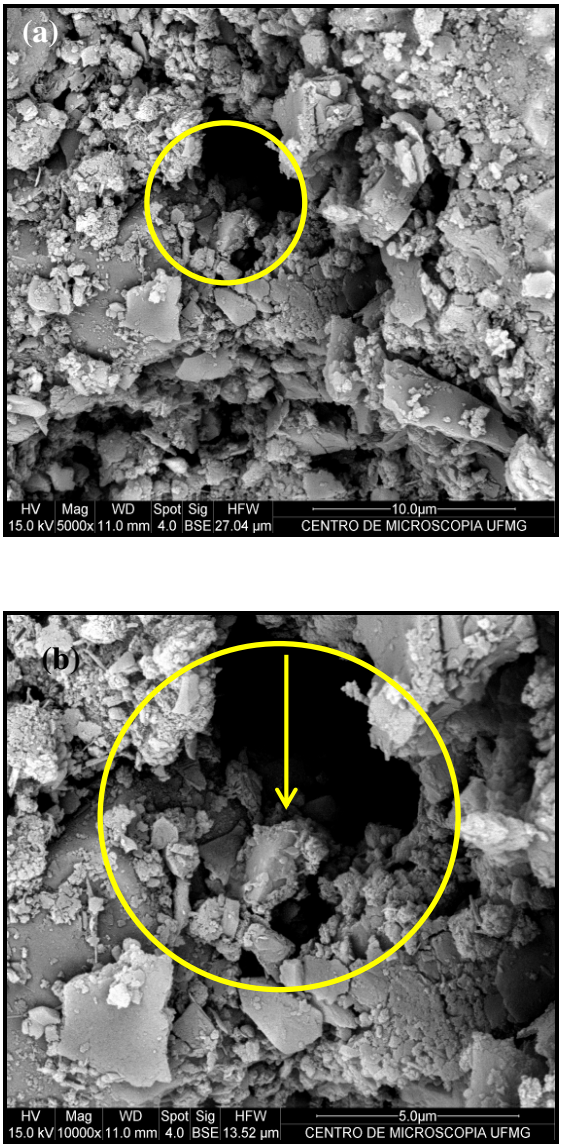


Figura 7.106 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.107 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

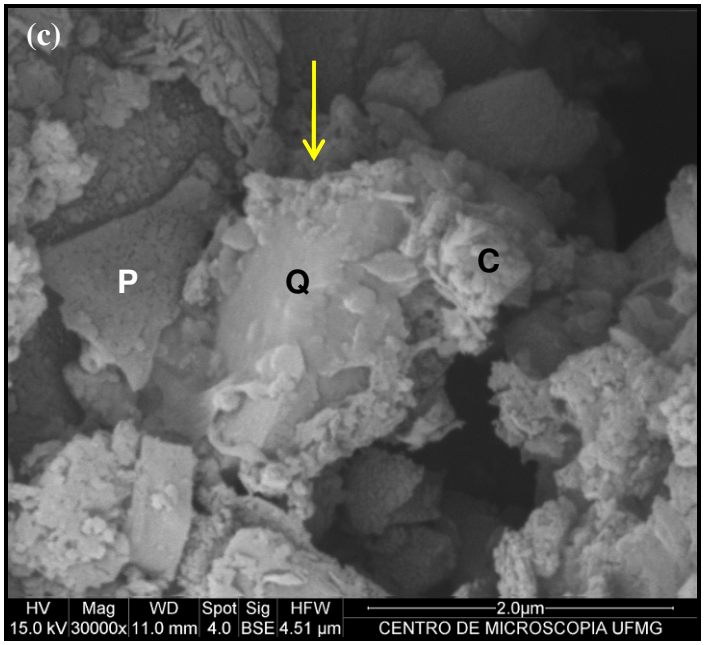


Figura 107 – Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.108 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia acima.

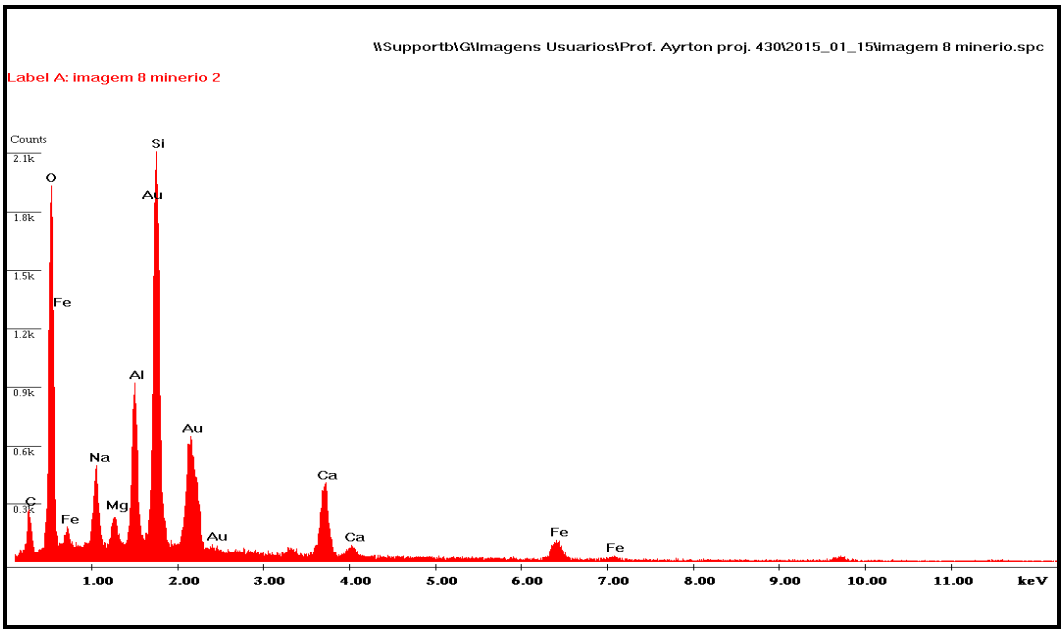


Figura 7.108 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior, destacando elemento de cristalização do cimento
Fonte: O autor, 2015.

A seguir podem ser vistas micrografias de baixa ampliação (50x) em amostra serrada de concreto com destaque das diferenças entre texturas superficiais (Figura 7.109). A ênfase está na partícula de goethita porosa.

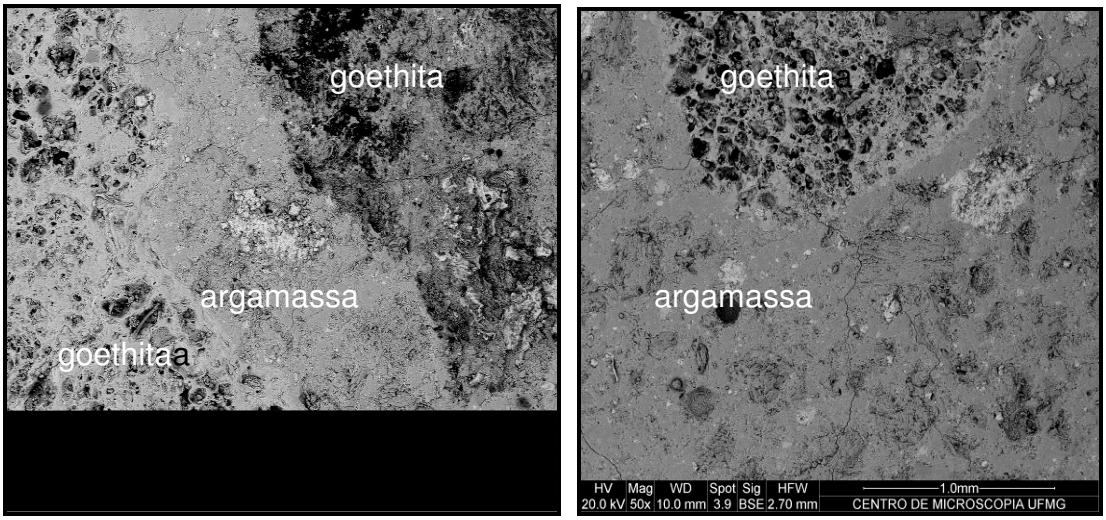
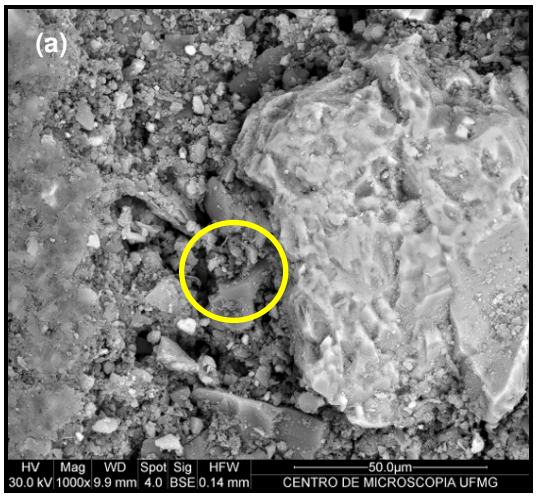


Figura 7.109 – Micrografias de baixa ampliação (50x) em amostra serrada de concreto; IER
Nota: Realce da diferença de textura superficial entre argamassa e condição porosa do rejeito
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.110 apresenta uma sequência de micrografias (a, b, c) em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto.



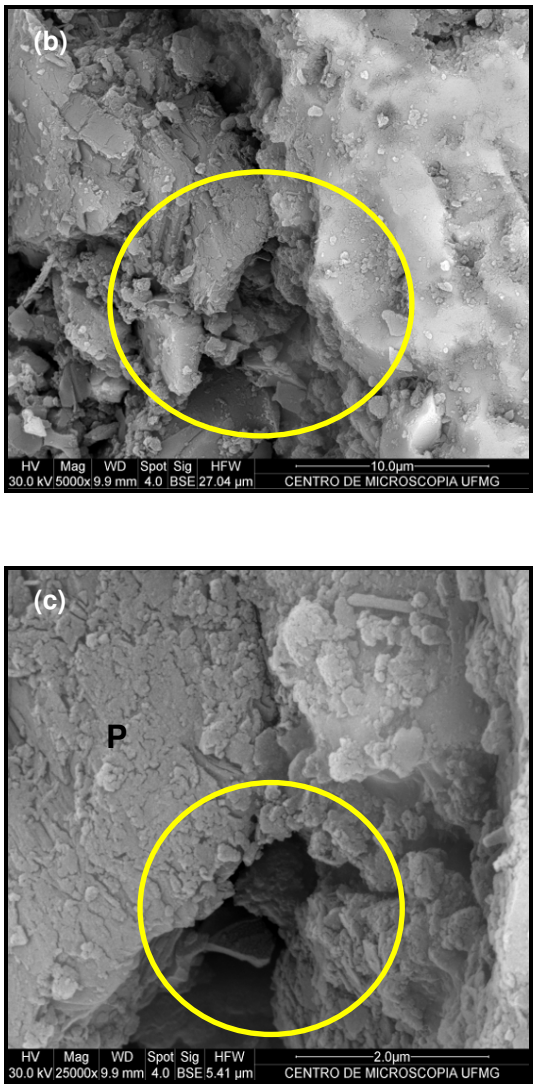


Figura 7.110 – Sequência de micrografias em amostra serrada de região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) detalhes da microestrutura na interface; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.111 apresenta micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto.

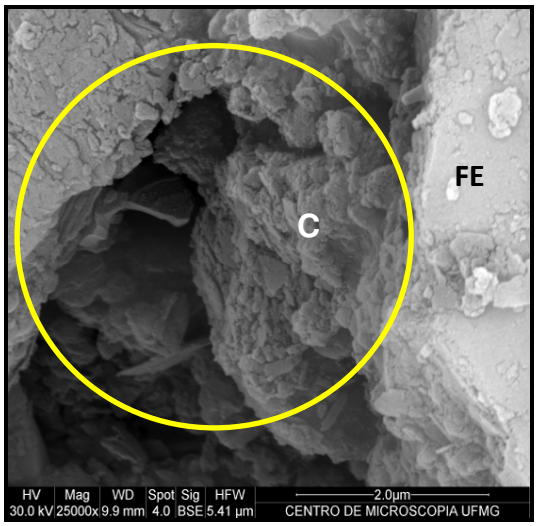


Figura 7.111 – Micrografia em amostra de superfície de fratura de região de interface obtida em amostra do concreto; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.112 mostra o espectograma da microanálise da micrografia anterior, destacando a presença de elemento do rejeito.

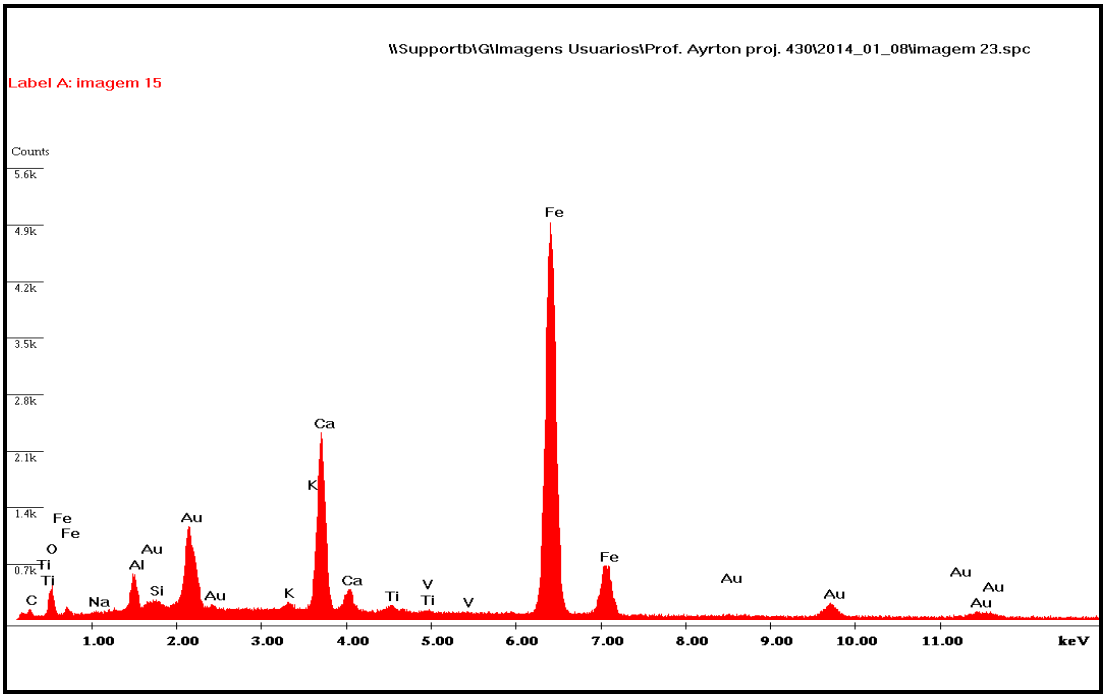


Figura 7.112 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior destacando a presença de elemento do rejeito
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 7.113 (d) pode ser observada, junto à interface do agregado de rejeito, região da matriz cimentícia com cristais euédricos muito pequenos, inclusive nanométricos, principalmente de portlandita.

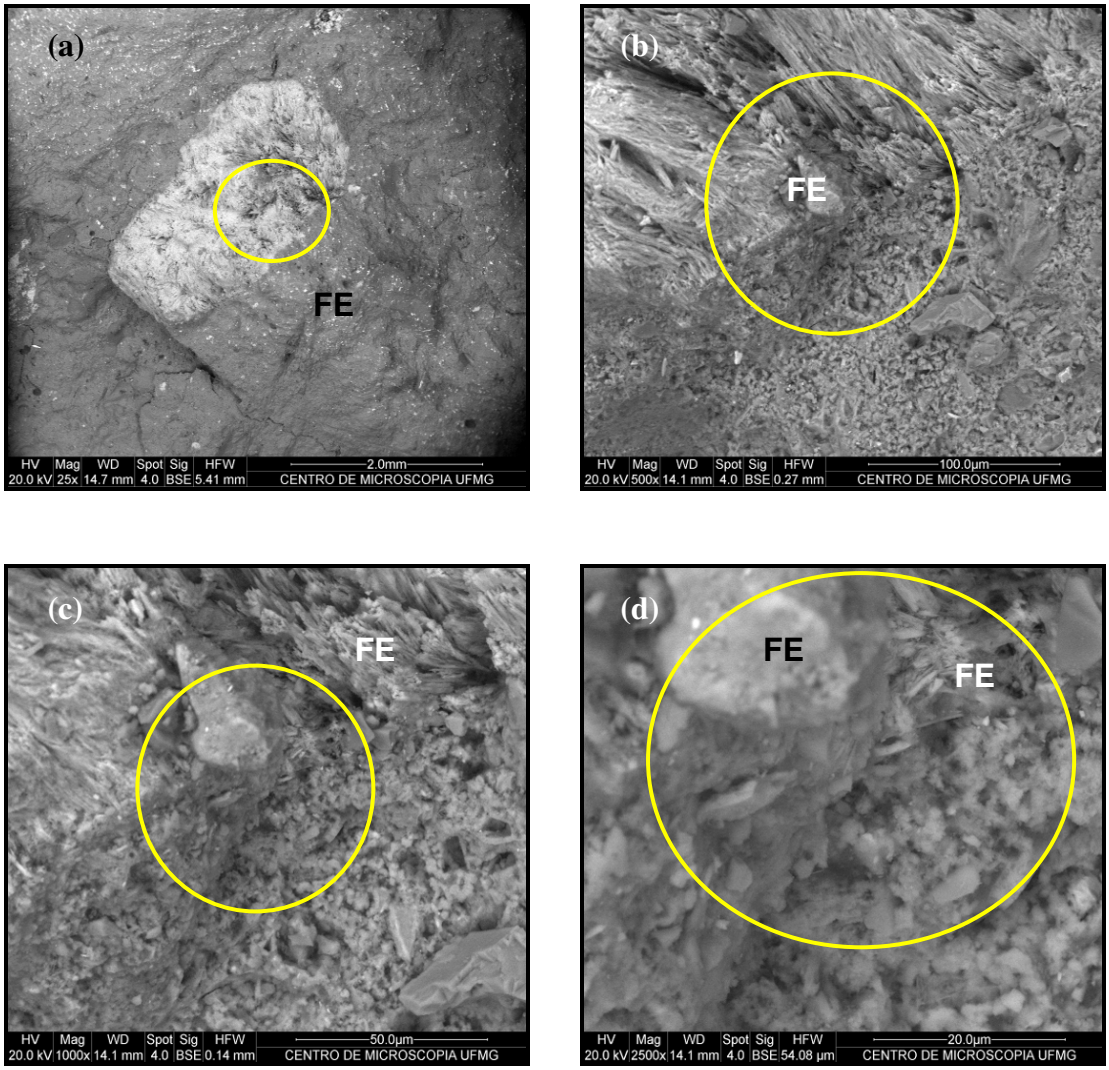


Figura 7.113 – Sequência de micrografias em superfície de fratura na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (d) detalhes da microestrutura na interface; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.114 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

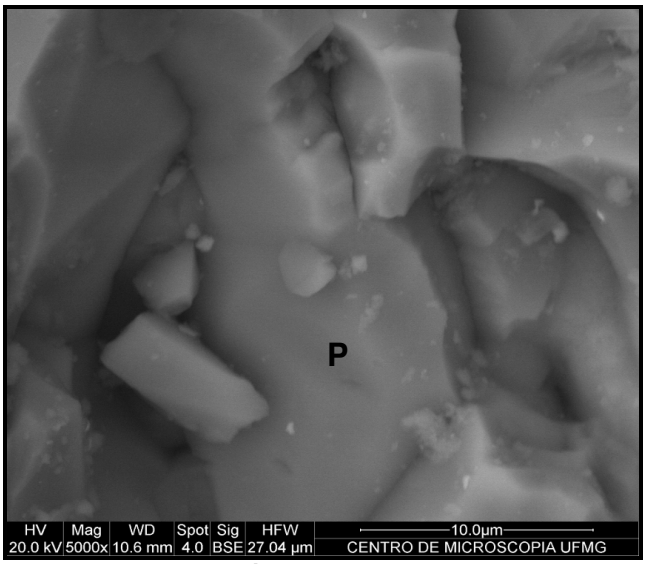


Figura 7.114 – Micrografia em superfície de fratura na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura na interface; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.115 mostra o espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 7.114 (com rejeito de *sinter feed*).

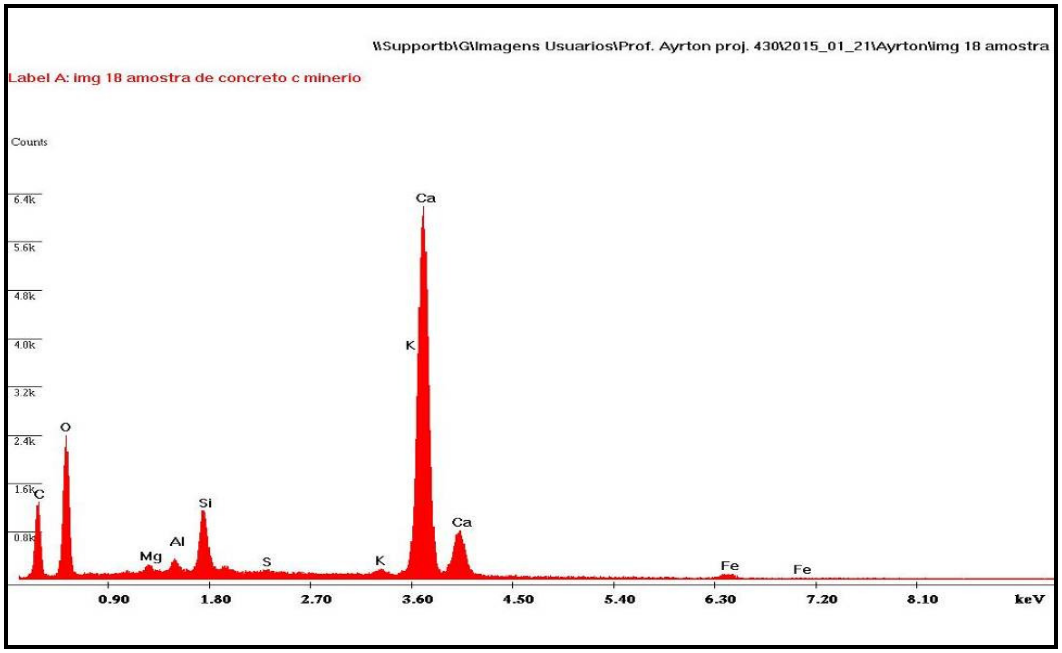


Figura 7.115 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

O conjunto de imagens seguintes (Figura 7.116) (a, b, c, d) ilustra aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados

empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS **sem o rejeito de *sinter feed***.

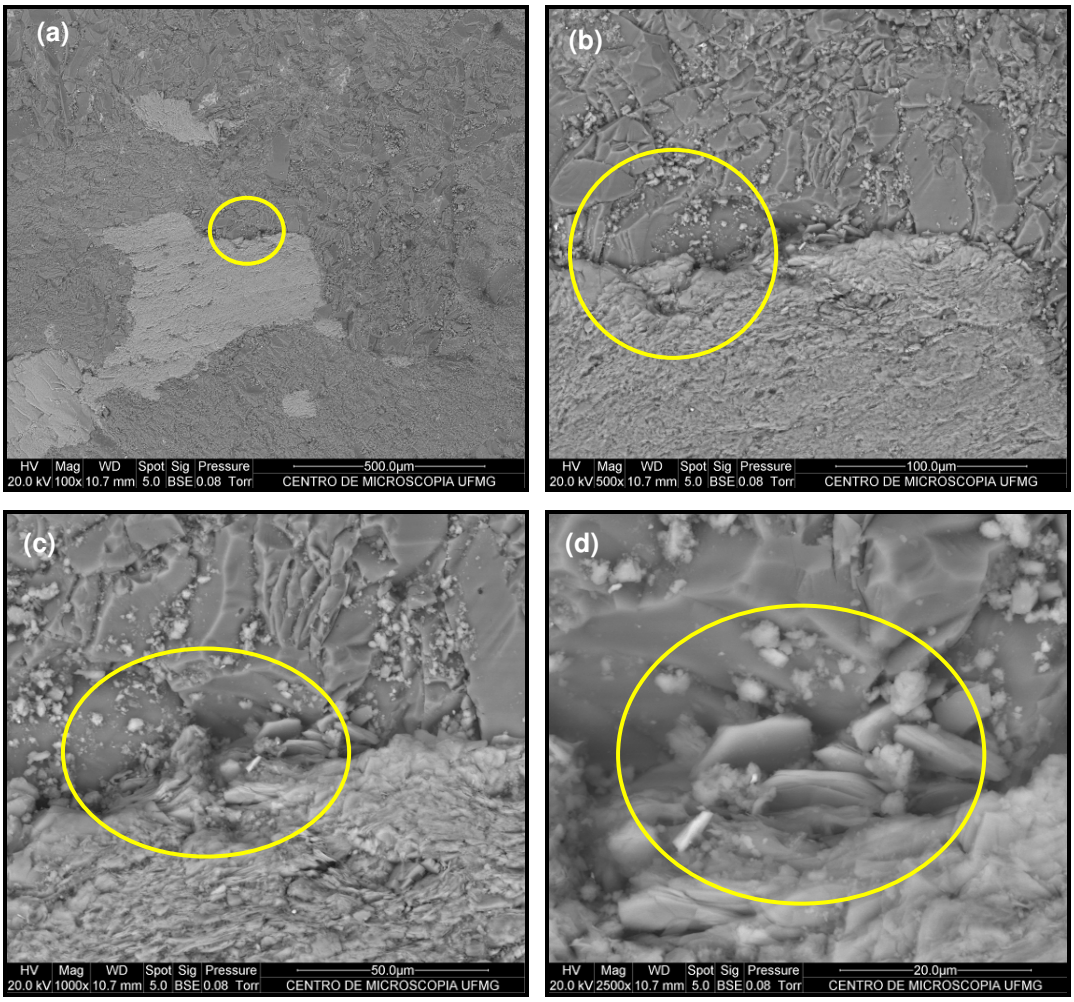


Figura 7.116 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.117 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

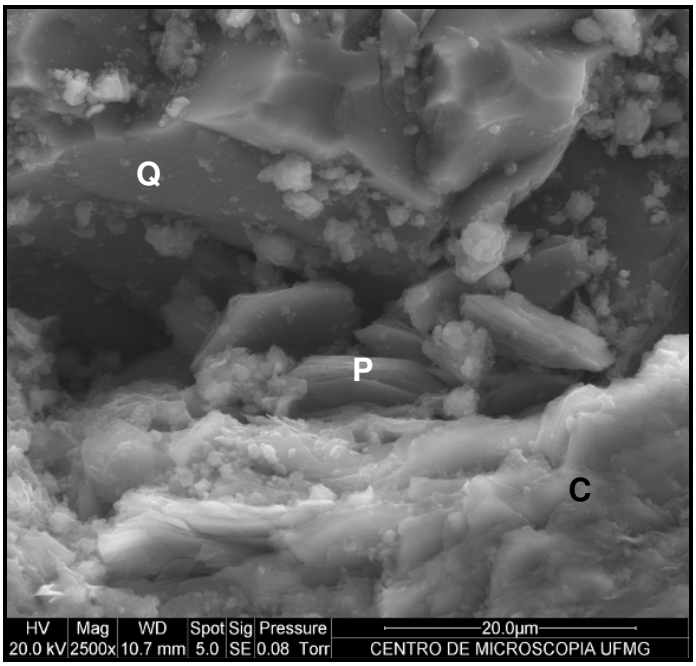


Figura 7.117 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto; detalhes da microestrutura; IES
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 7.117 pode-se observar CSH fraturado na interface com o agregado quartzoso com resquícios de portlandita/carbonato de cálcio. A Figura 7.118 demonstra o espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 7.117.

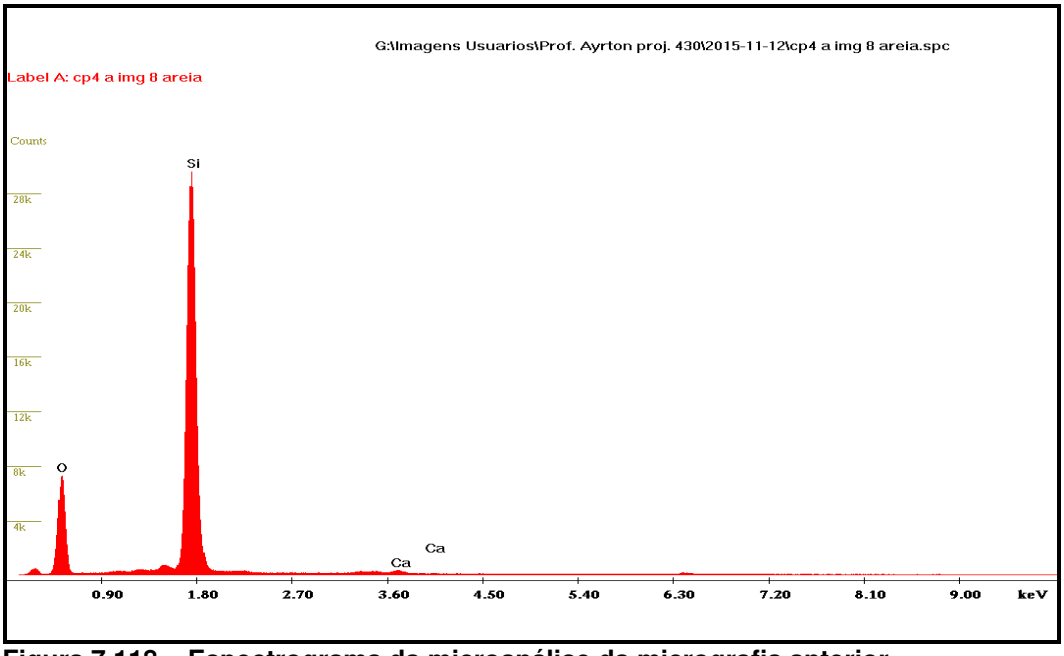


Figura 7.118 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.119 apresenta a sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) detalhes da microestrutura.

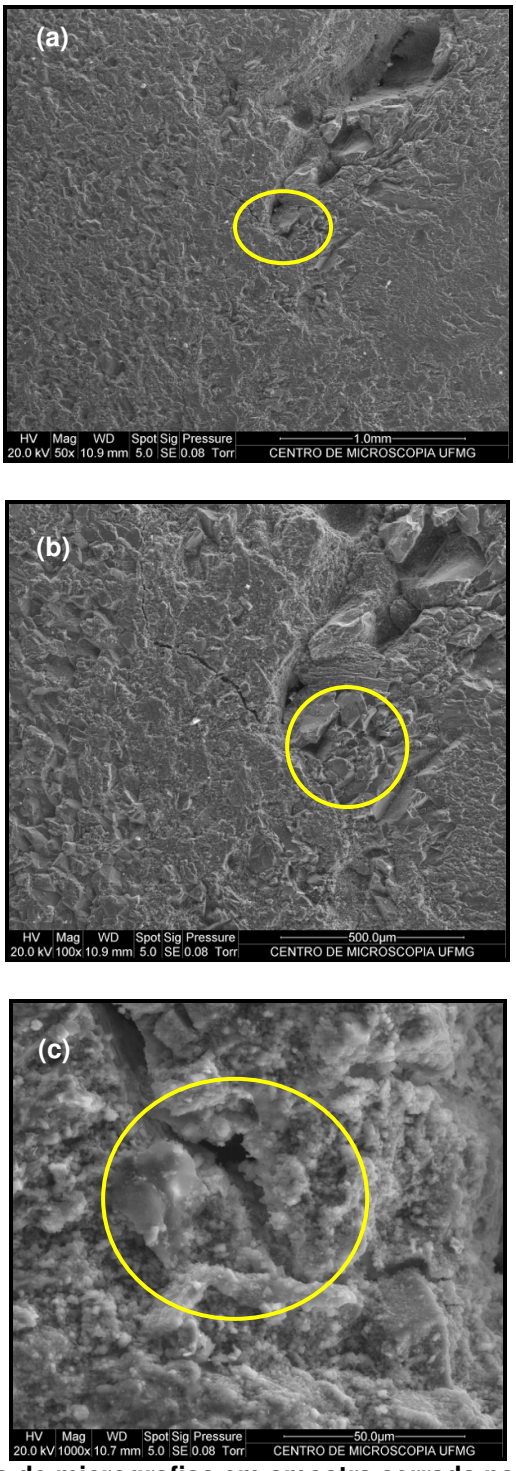


Figura 7.119 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) detalhes da microestrutura; IES
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.120 apresenta parte da sequência das micrografias anteriores, ressaltando-se a presença de CSH e grãos anédricos de calcita/portlandita.

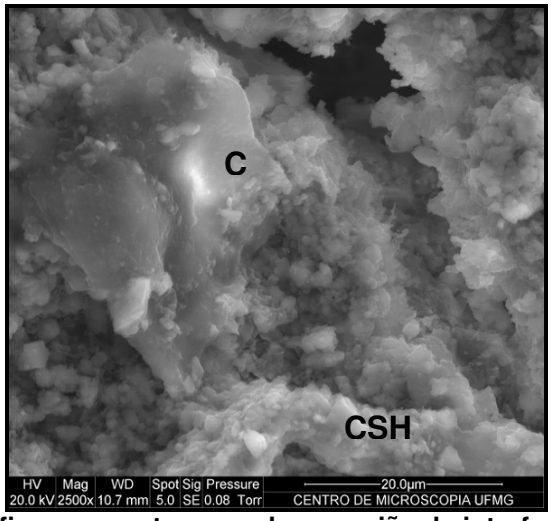


Figura 7.120 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IES
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.121 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior.

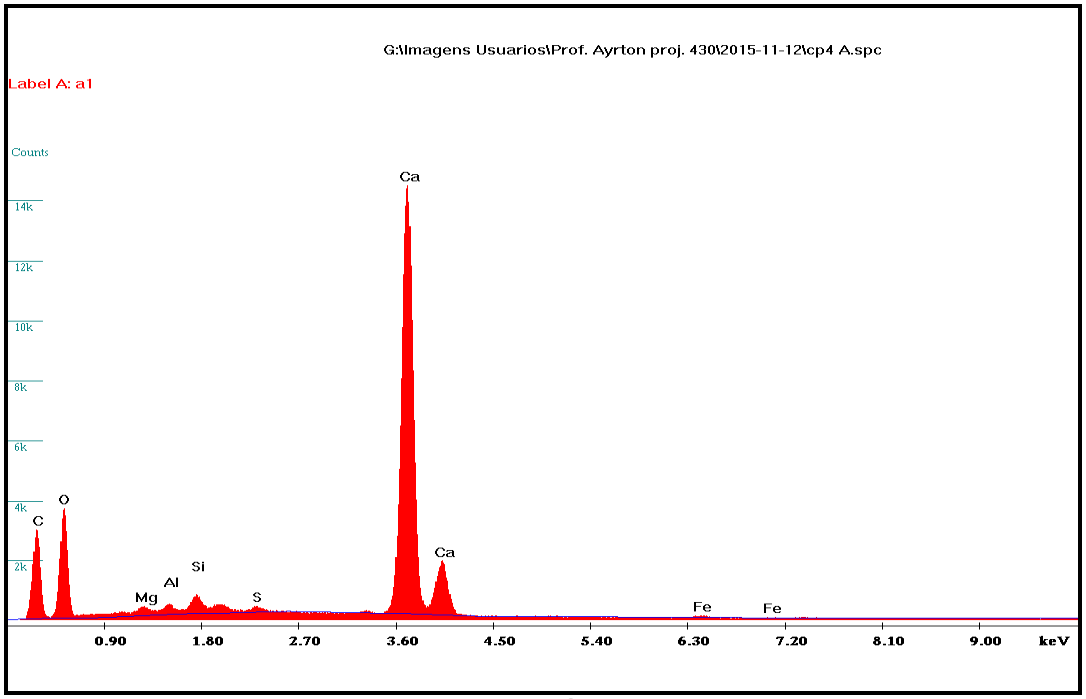


Figura 7.121 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

O conjunto de imagens seguintes (Figura 7.122) ilustram aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS **com o rejeito de *sinter feed*.**

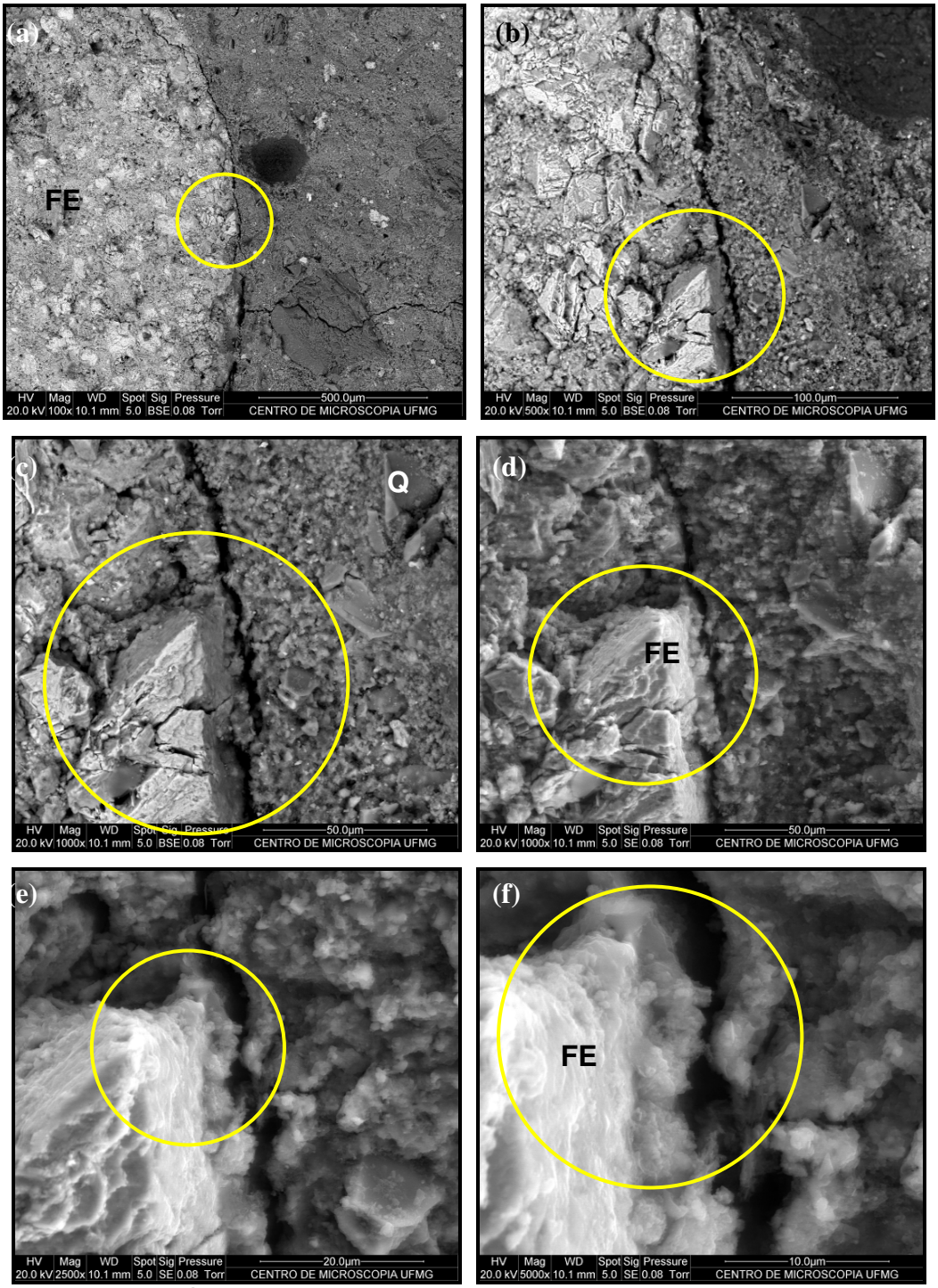


Figura 7.122 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (e) e (f) detalhes da microestrutura; a, b,c = IER; d, e, f = IES
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.123 demonstra a sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto.

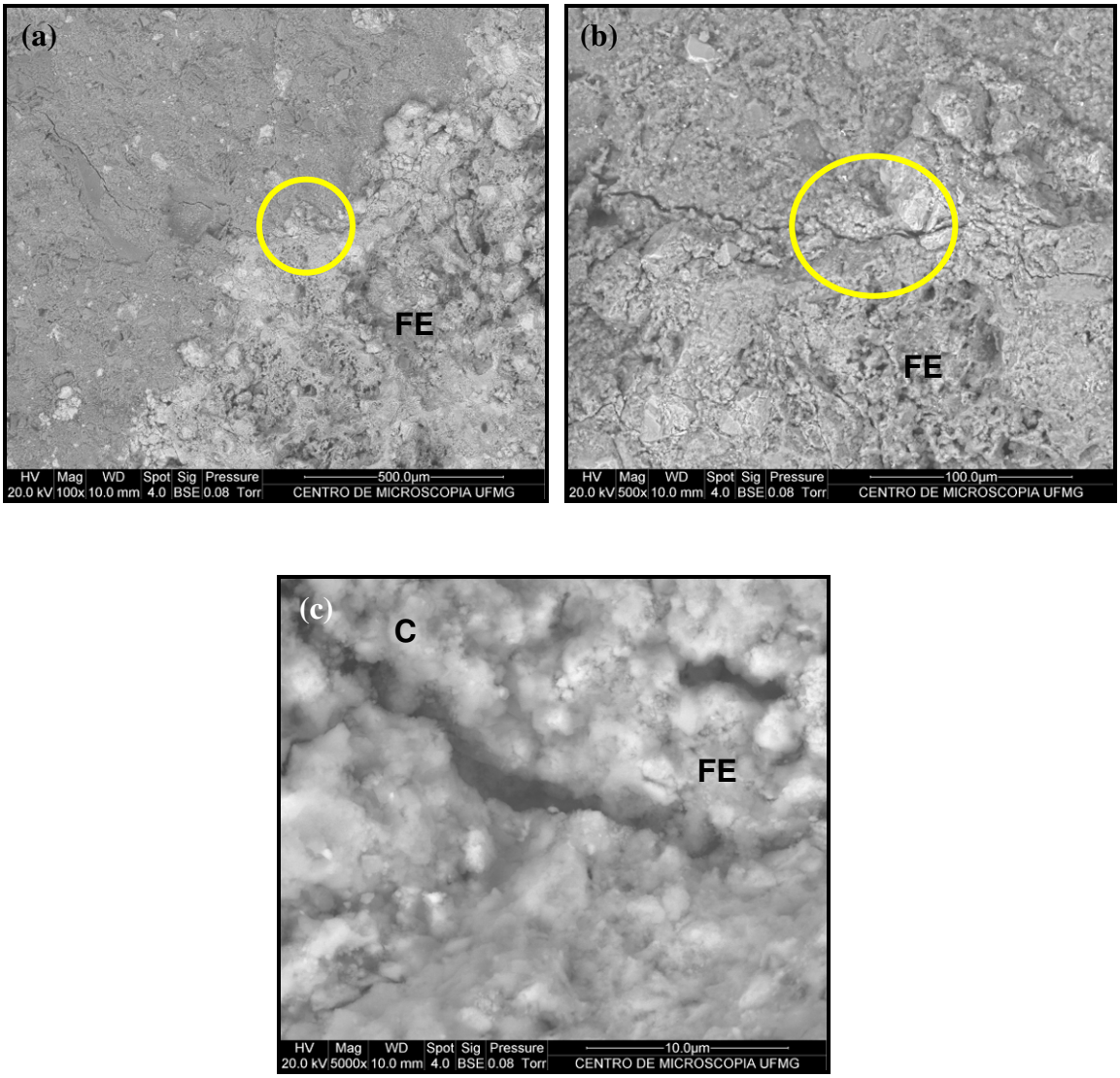


Figura 7.123 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.124 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

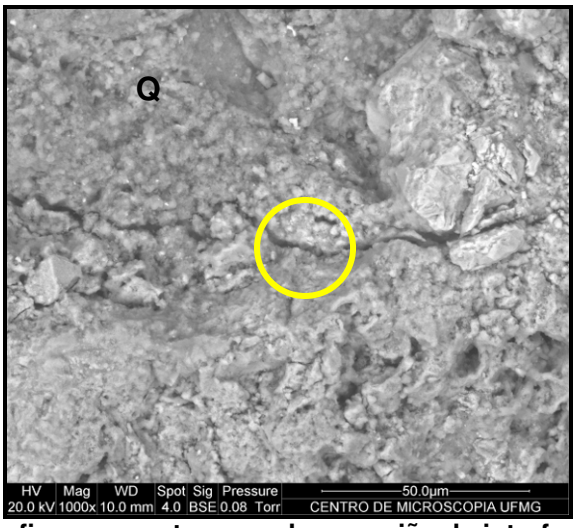


Figura 7.124 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IES
Fonte: O autor, 2015.

Segue-se a Figura 7.125, que apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior.

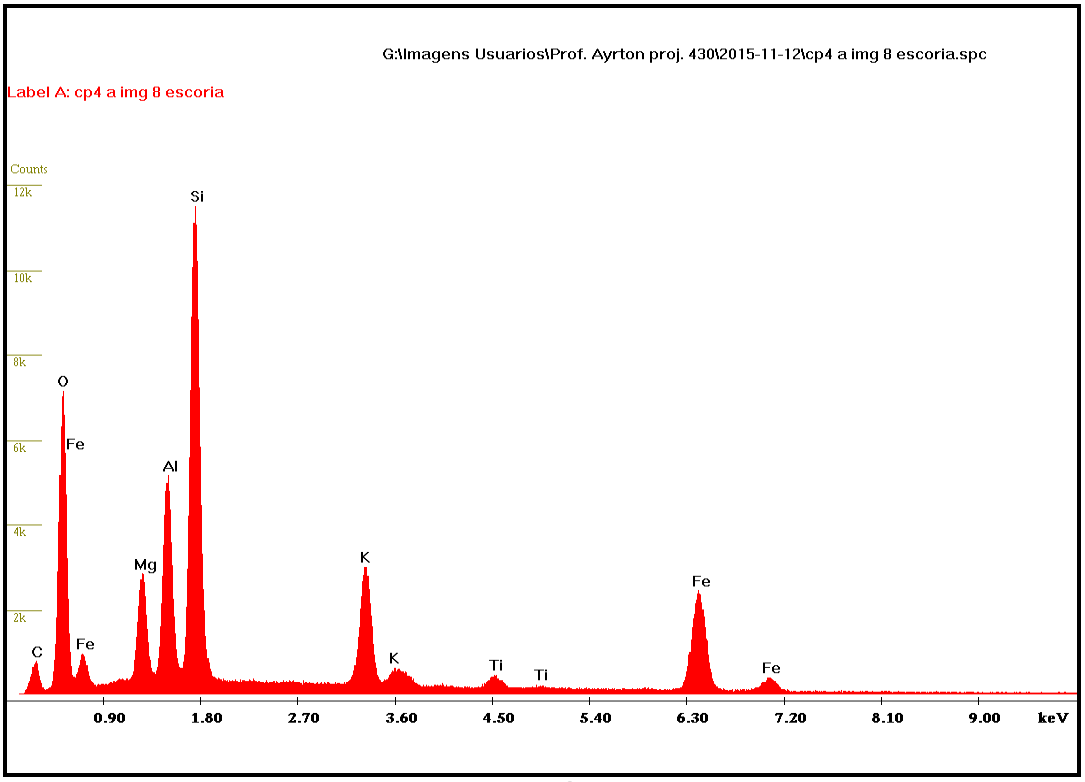


Figura 7.125 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

7.2.2. Estudos comparativos de microscopia de varredura de elétrons das zonas de transição – Interface pasta/agregado – concretos com fator a/c = 0,52

De forma análoga ao descrito em 7.2.1, foram preparadas amostras para a microscopia eletrônica de varredura dos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS, amostras serradas, bem como as de fratura, conforme apresentadas nas Figuras 7.126 e 7.127:



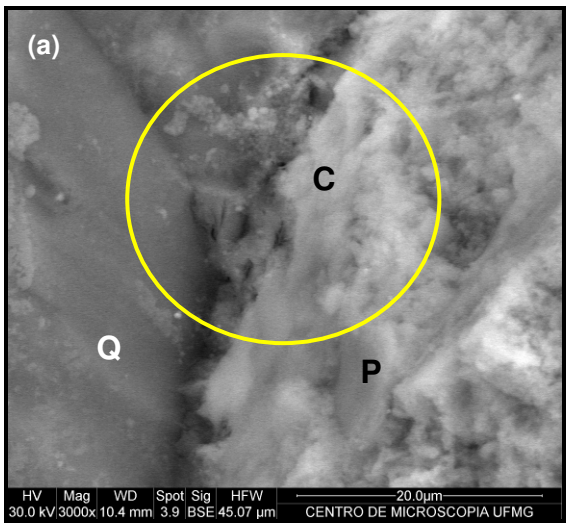
Figura 7.126 – Amostras semiprontas dos concretos com e sem rejeito, serradas, antes da metalização



Figura 7.127 – Amostras semiprontas dos concretos com e sem rejeito, fraturadas, antes da metalização

Fonte: Dados de pesquisa, 2015.

O conjunto de imagens seguintes (a, b, c) ilustra aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS, **sem o rejeito de *sinter feed*** (Figura 7.128).



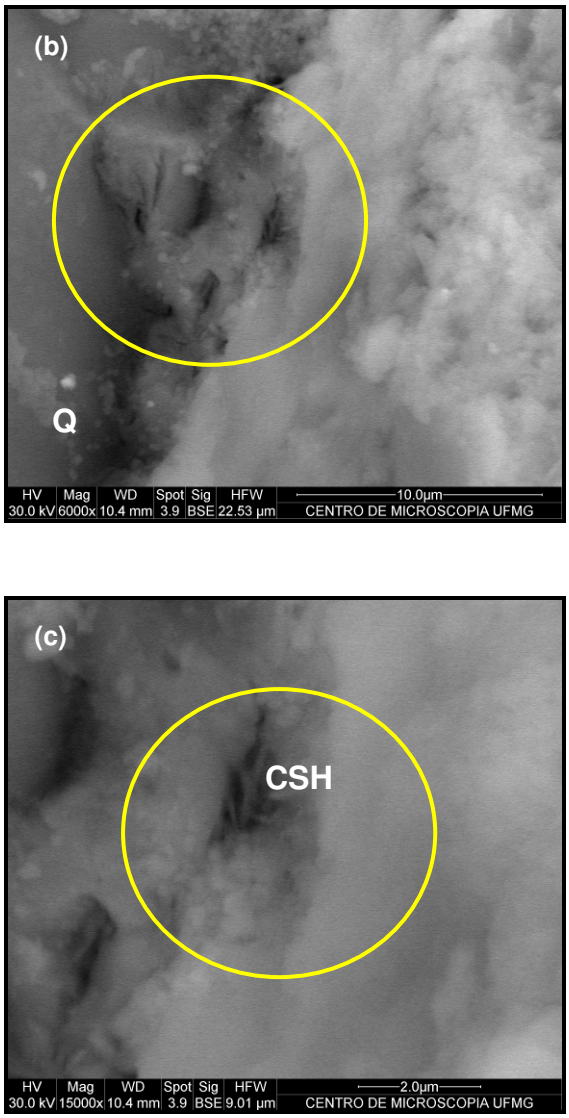


Figura 7.128 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.129 demonstra micrografia em amostra do concreto integrante da sequência anterior, em amostra serrada na região de interface, obtidas em amostra fraturada do concreto.

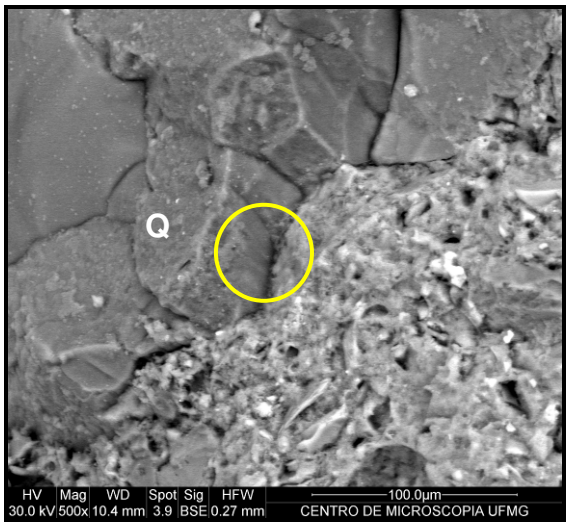


Figura 7.129 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.130 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior.

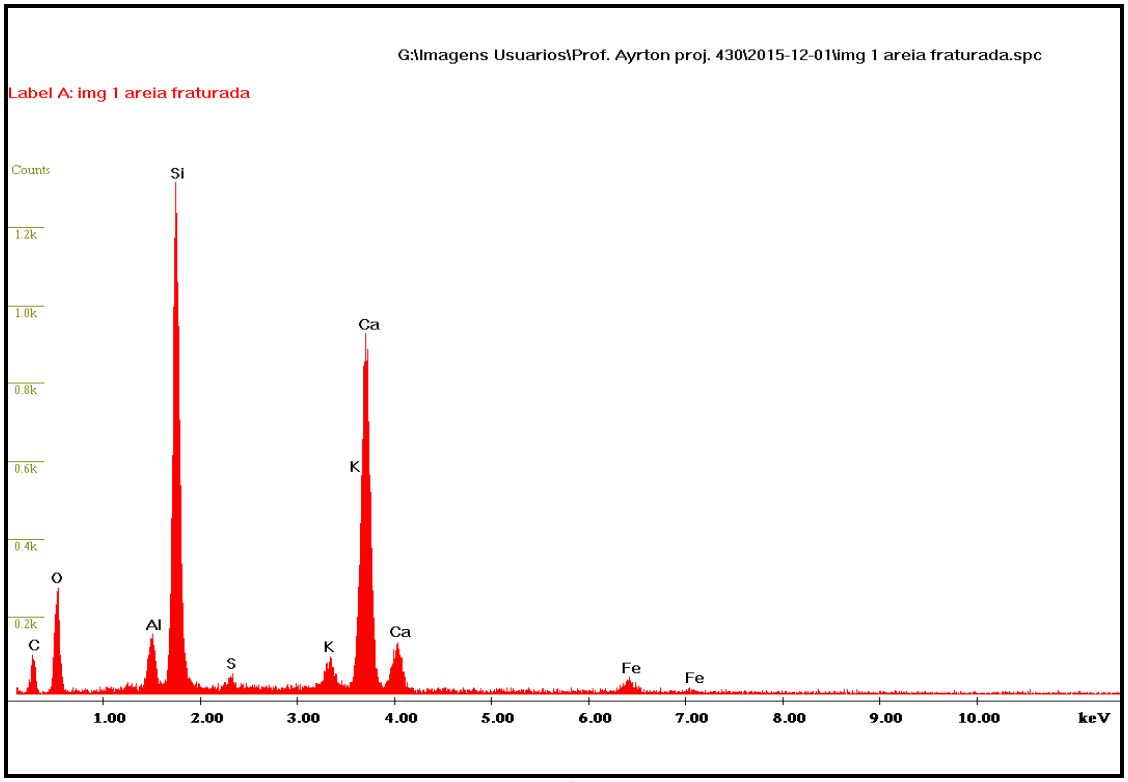


Figura 7.130 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

O conjunto de imagens a seguir ilustra aspectos específicos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS sem o rejeito de *sinter feed* (Figura 7.131).

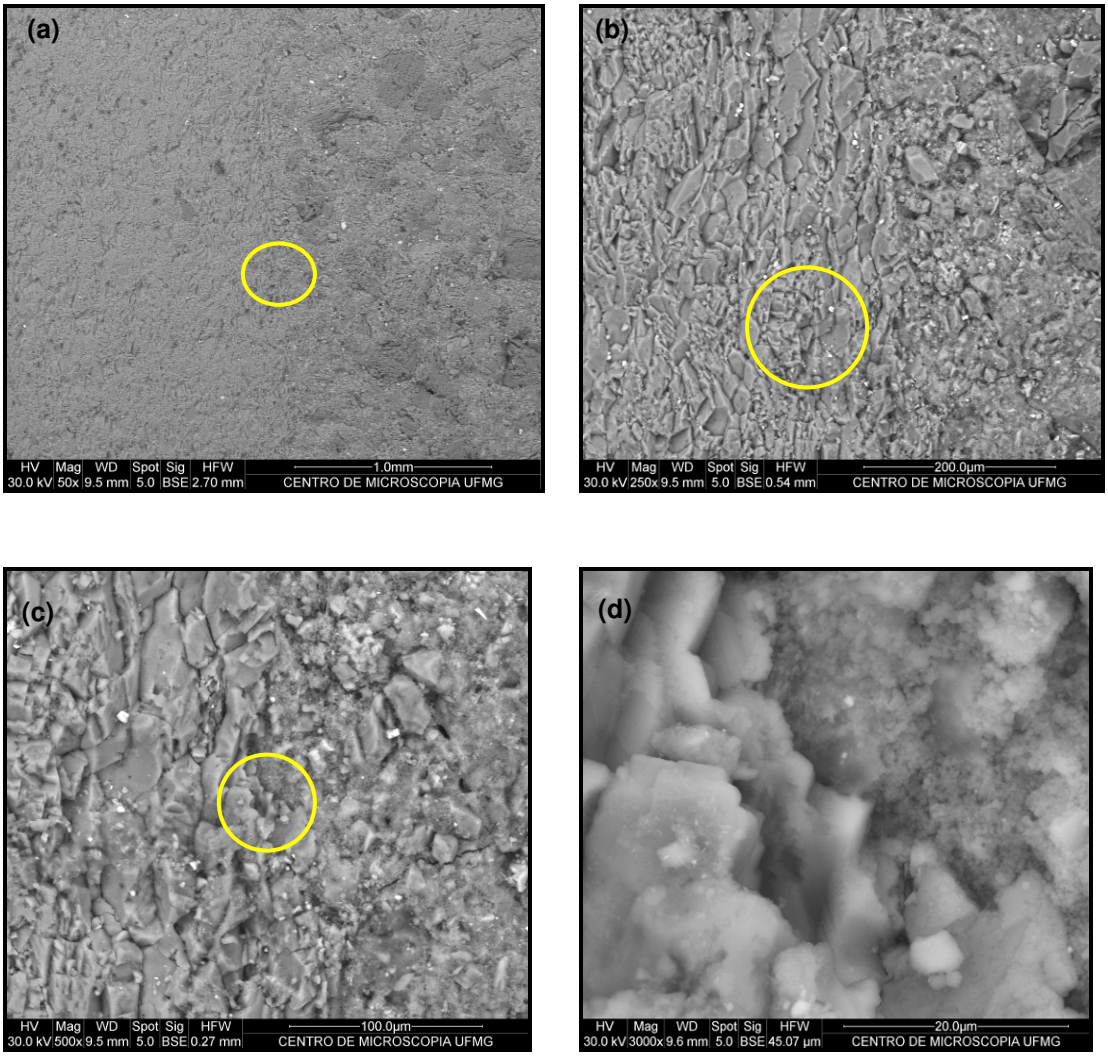


Figura 7.131 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (d) detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.132 apresenta micrografia em amostra serrada de região de interface obtida em amostra do concreto integrante da sequência anterior.

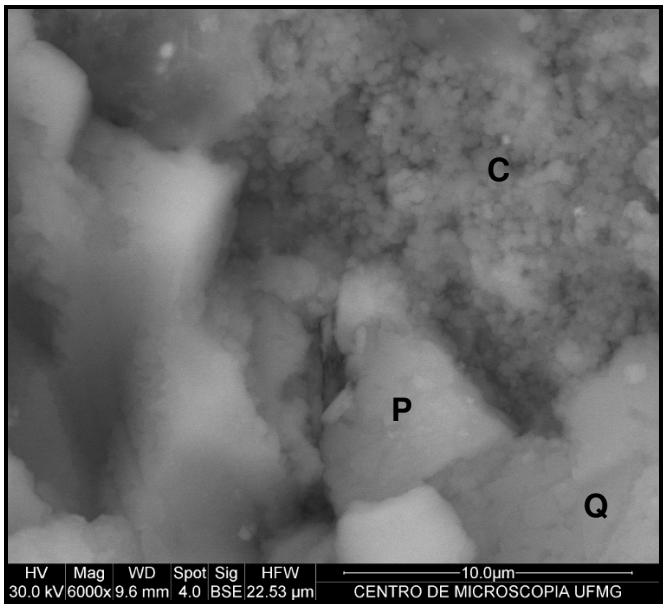


Figura 7.132 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.133 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia anterior.

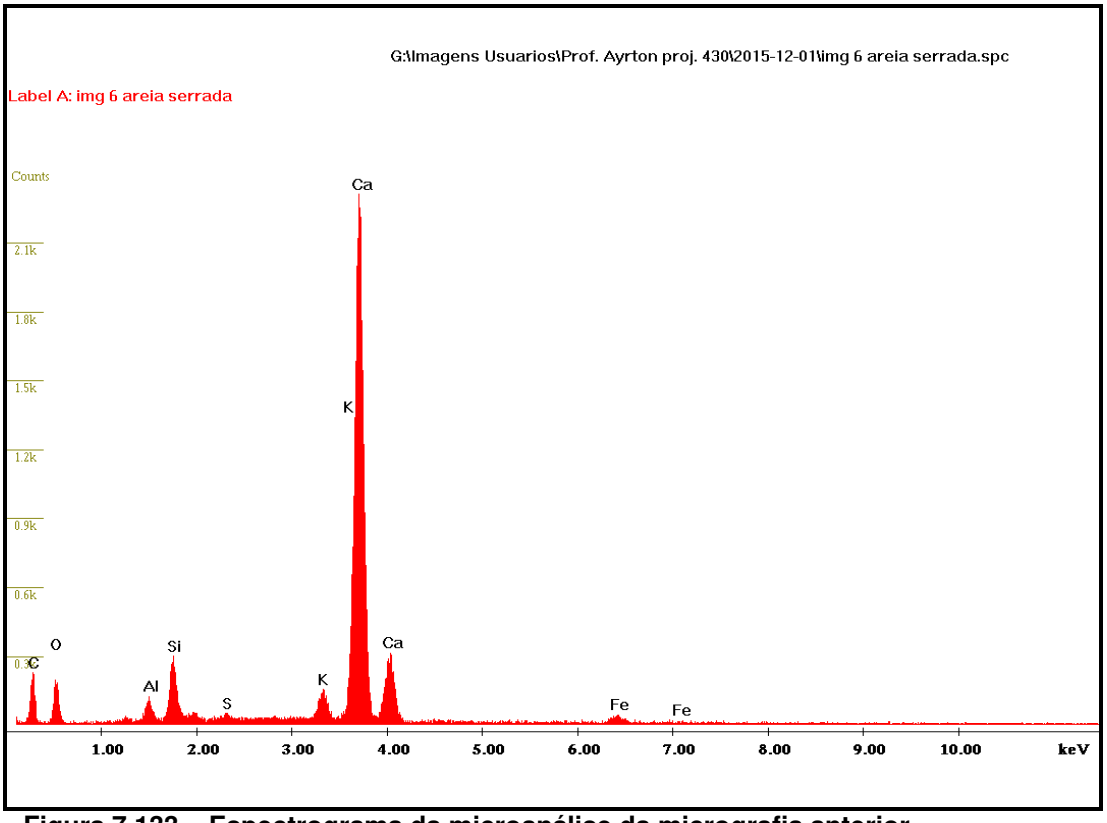


Figura 7.133 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

O conjunto de imagens seguintes (Figura 7.134) ilustra aspectos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS **com o rejeito de *sinter feed*.**

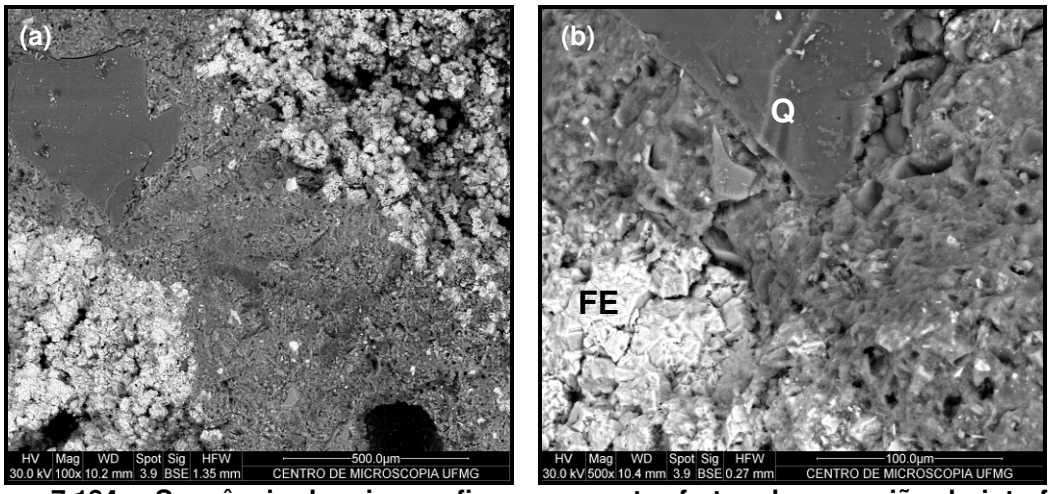


Figura 7.134 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (a) e (b) detalhes da microestrutura em baixa ampliação (100x); IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.135 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia (a) da Figura 7.134.

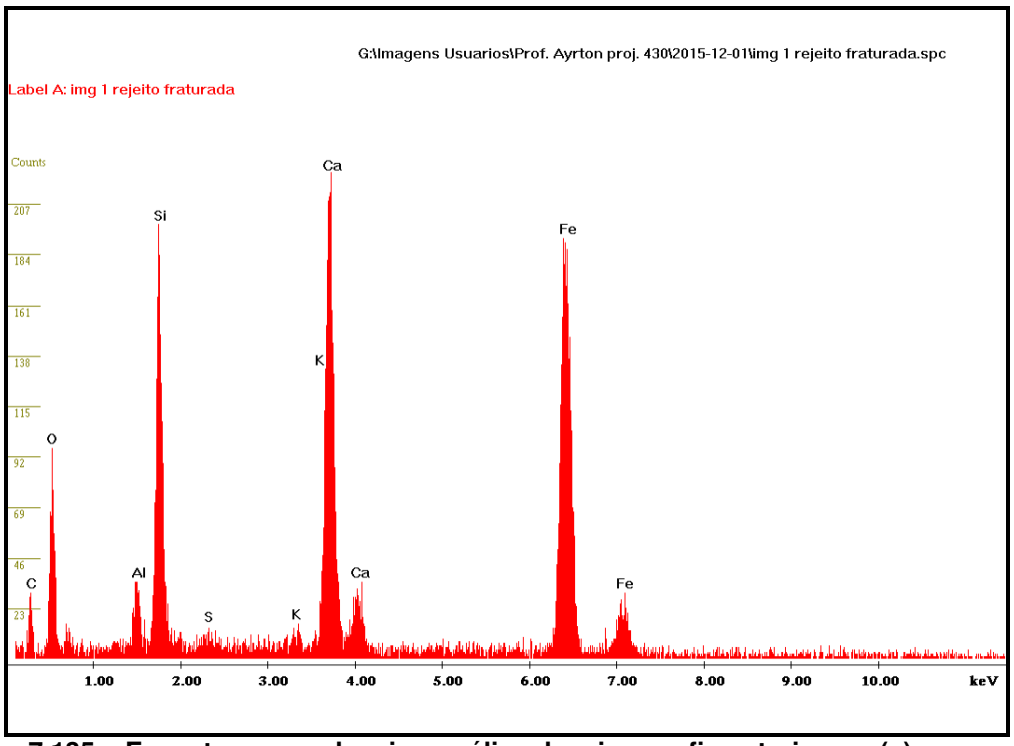


Figura 7.135 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior em (a)
Fonte: O autor, 2015.

O conjunto de imagens seguintes (Figura 7.136) ilustra aspectos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS com o rejeito de *sinter feed*.

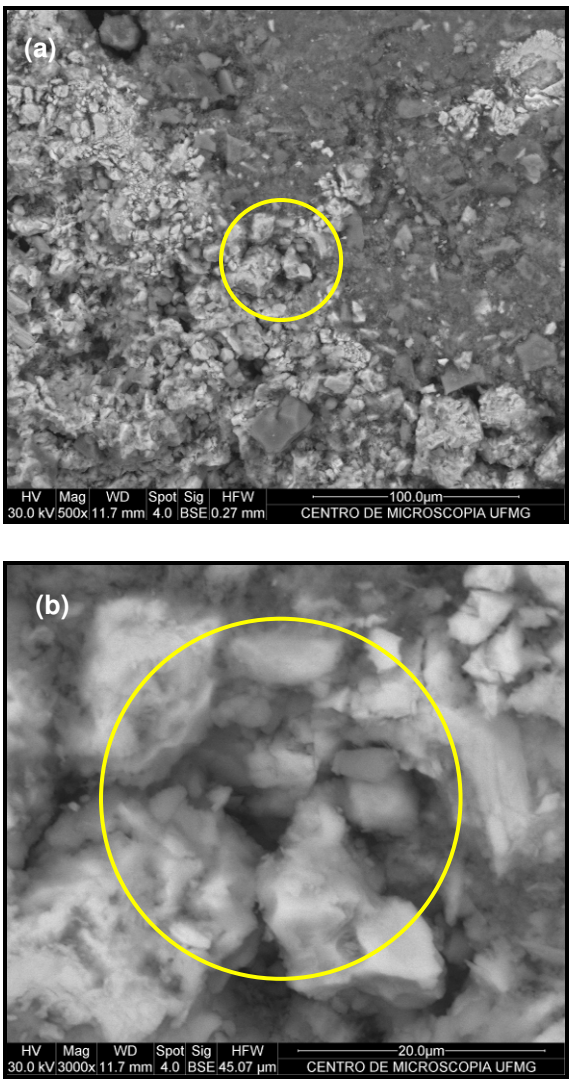


Figura 7.136 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando-se em (b) detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.137 faz parte da sequência de micrografias da Figura 7.136.

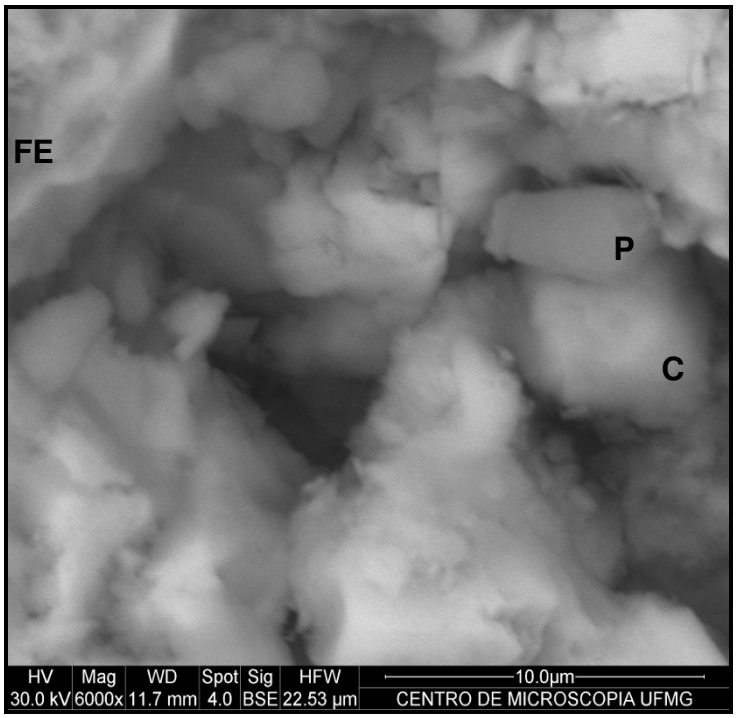


Figura 7.137 – Micrografia em amostra serrada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.138 apresenta o espectrograma da microanálise da micrografia da Figura 7.137.

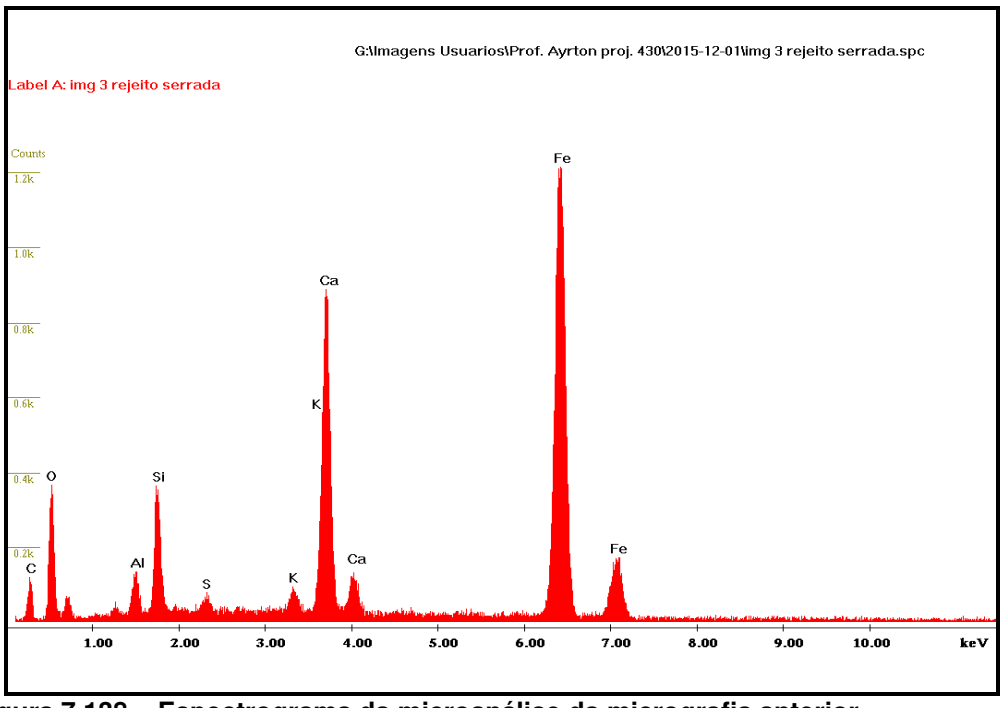


Figura 7.138 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

O conjunto de imagens seguintes (Figura 7.139) ilustra aspectos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS com o rejeito de *sinter feed*.

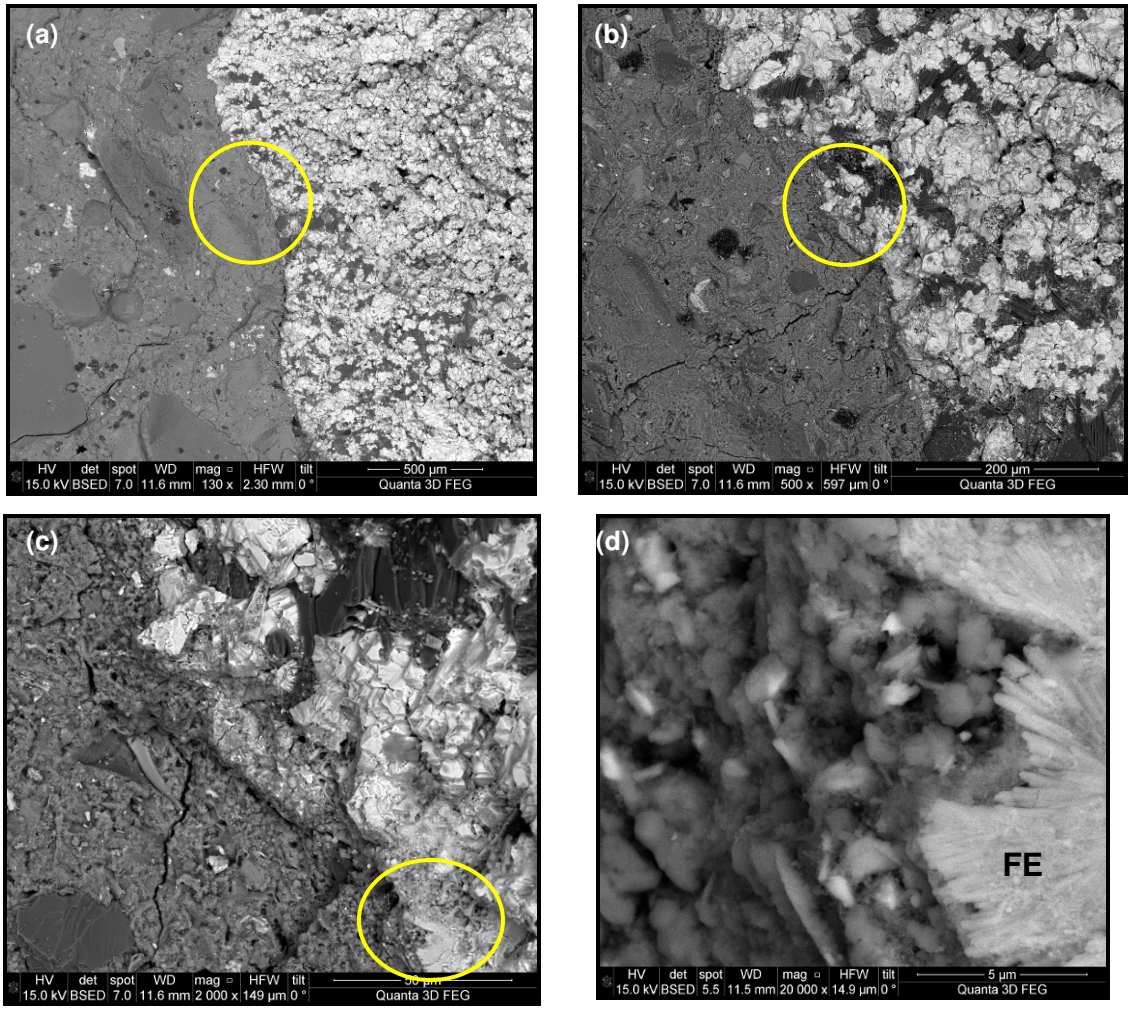


Figura 7.139 – Sequência de micrografias em amostra fraturada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (c) e (d) detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.140 a seguir integra a sequência anterior, da qual é apresentado também o respectivo espectograma (Figura 7.141).

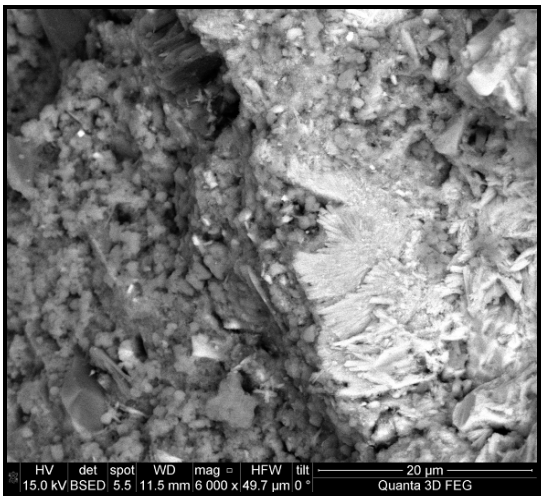


Figura 7.140 - Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura: IER
Fonte: O autor, 2015.

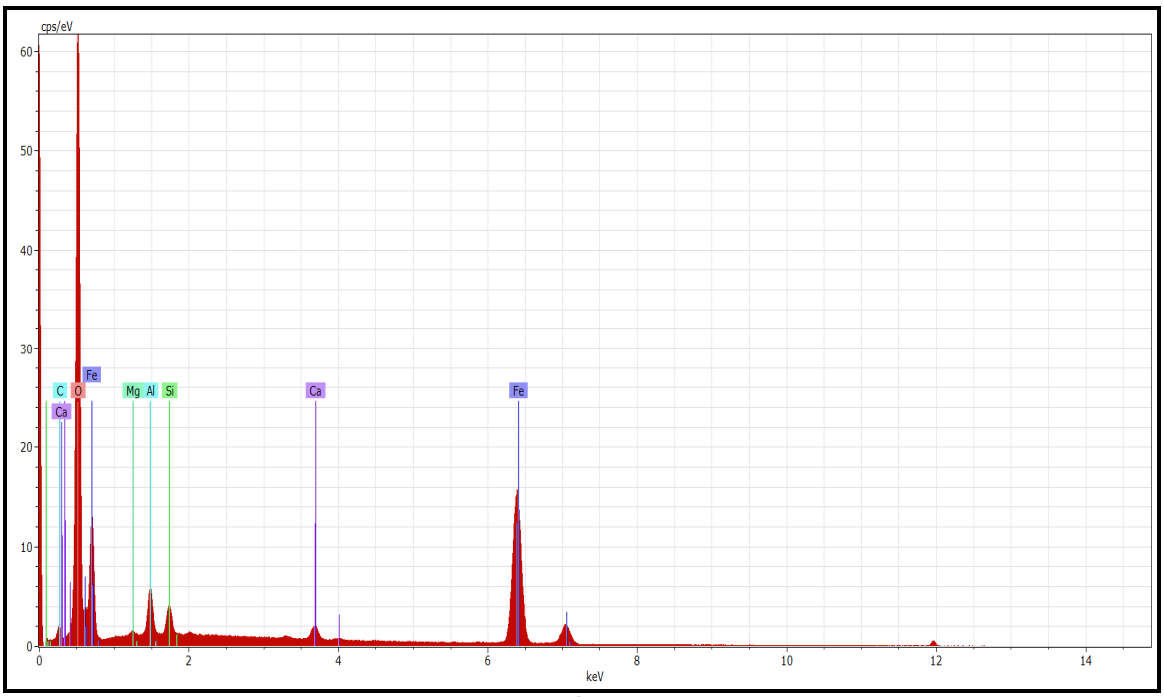
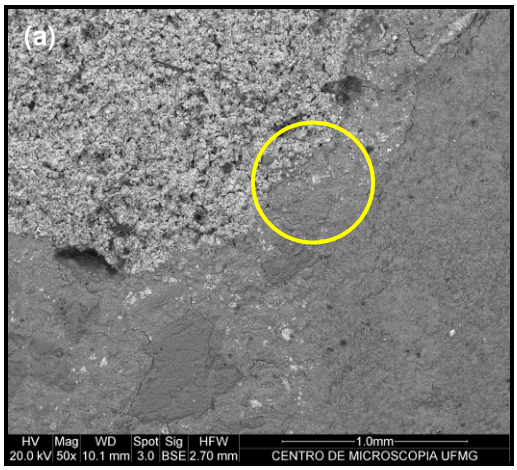
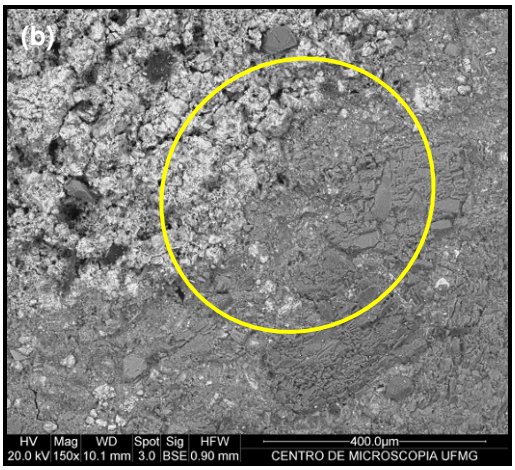
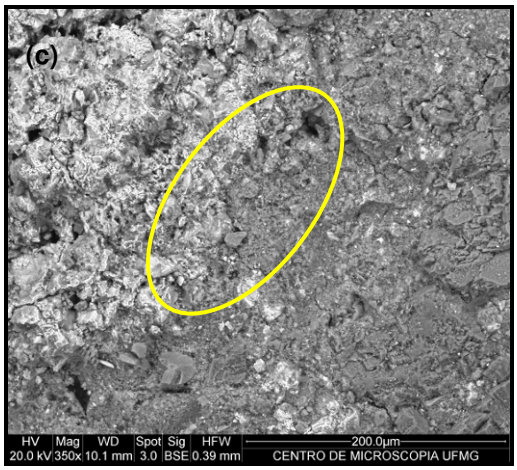


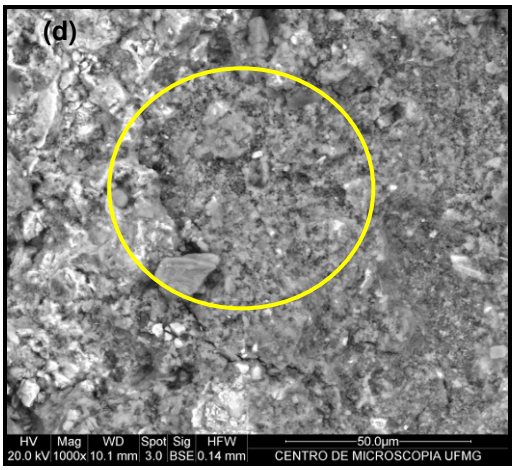
Figura 7.141 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

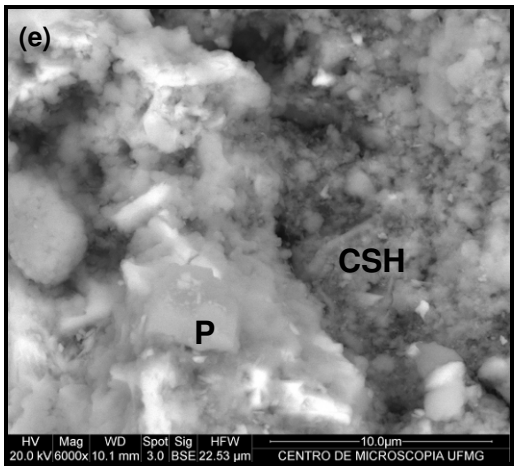
O conjunto de imagens seguintes (Figura 7.142) (a, b, c, d, e, f, g) ilustra aspectos das interfaces da pasta de cimento e a superfície dos agregados empregados nos concretos produzidos com o cimento CP IV - 40 RS com o rejeito de *sinter feed*.

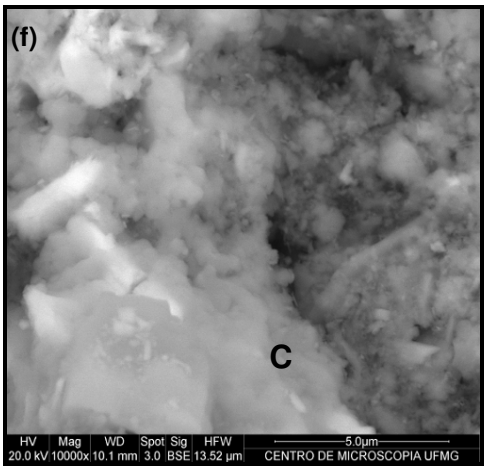

(a)
HV Mag WD Spot Sig HFW
20.0 kV 50x 10.1 mm 3.0 BSE 2.70 mm
1.0mm
CENTRO DE MICROSCOPIA UFMG


(b)
HV Mag WD Spot Sig HFW
20.0 kV 150x 10.1 mm 3.0 BSE 0.90 mm
400.0µm
CENTRO DE MICROSCOPIA UFMG


(c)
HV Mag WD Spot Sig HFW
20.0 kV 350x 10.1 mm 3.0 BSE 0.39 mm
200.0µm
CENTRO DE MICROSCOPIA UFMG


(d)
HV Mag WD Spot Sig HFW
20.0 kV 1000x 10.1 mm 3.0 BSE 0.14 mm
50.0µm
CENTRO DE MICROSCOPIA UFMG


(e)
CSH
P
HV Mag WD Spot Sig HFW
20.0 kV 6000x 10.1 mm 3.0 BSE 22.53 µm
10.0µm
CENTRO DE MICROSCOPIA UFMG


(f)
C
HV Mag WD Spot Sig HFW
20.0 kV 10000x 10.1 mm 3.0 BSE 13.52 µm
5.0µm
CENTRO DE MICROSCOPIA UFMG

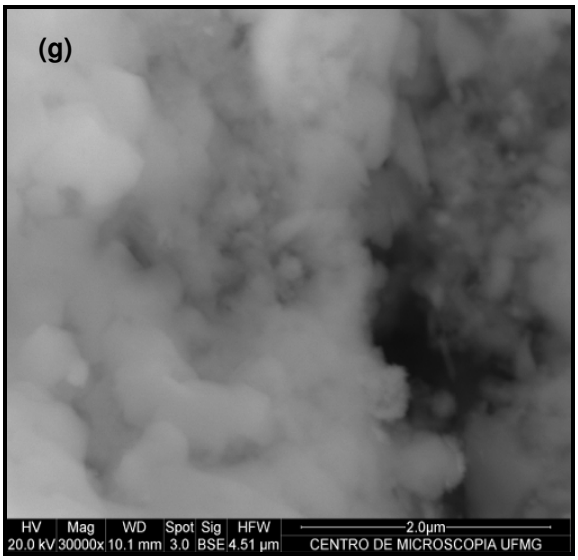


Figura 7.142 – Sequência de micrografias em amostra serrada na região de interface obtidas em amostra do concreto, destacando em (e), (f) e (g) detalhes da microestrutura; IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.143 a seguir integra a sequência anterior.

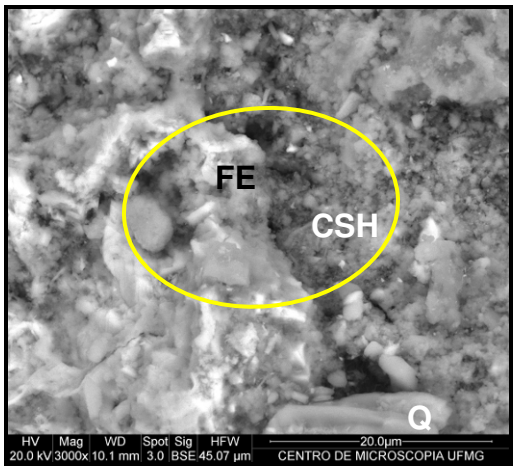


Figura 7.143 – Micrografia em amostra fraturada na região de interface obtida em amostra do concreto, destacando detalhes da microestrutura: IER
Fonte: O autor, 2015.

A Figura 7.144 apresenta o espectograma da Figura 7.143.

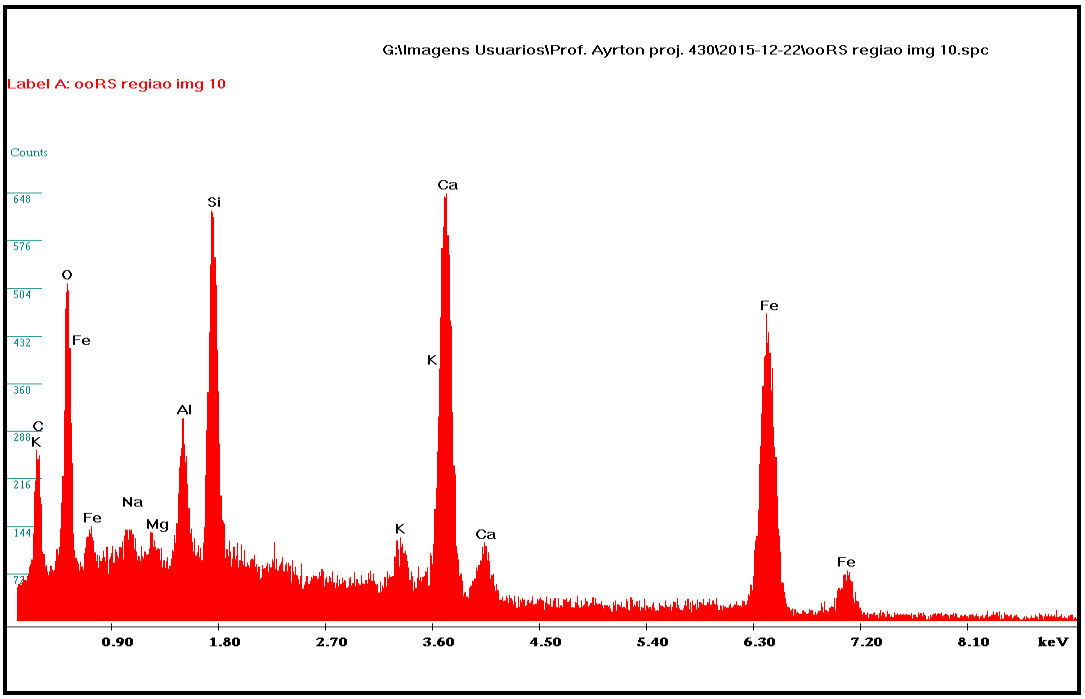


Figura 7.144 – Espectrograma da microanálise da micrografia anterior
Fonte: O autor, 2015.

É possível observar que a falta de organização morfológica dos cristais na microestrutura é grande quando se tem a presença do cimento CP IV-40 RS. Possivelmente, isto se deve a sua composição específica e variada, pois é obtido a

partir do uso de gesso, escória de alto-forno (ácida e/ou básica sendo granulada e/ou bruta) e clínquer.

Assim sendo, de forma resumida, foram observadas as seguintes tendências de cristalização, de morfologia e de tamanho de grãos:

- Concreto sem rejeito, a/c=0,63: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio com tamanho reduzido, com presença tímida nas zonas de interface agregado x pasta. Foram observados CSH e etringita, igualmente, de forma tímida e em tamanhos pequenos.
- Concreto sem rejeito de *sinter feed*, a/c=0,52: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio de tamanho corrente usual quando localizado fora da zona de interface. Nas zonas de interface observou-se um emaranhado de CSH, etringita e carbonato de cálcio um pouco mais refinado. O tamanho de pouquíssimos silicatos e monossulfatos observados é diminuto/pequeno.
- Concreto com rejeito de *sinter feed*, a/c=0,63: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio com tamanho reduzido, caracterizada por região de refinamento de grãos cristalizados e se comparada com a morfologia dos carbonatos de misturas sem rejeito, apresenta menores tamanhos. Em relação ao CSH e etringitas observados, percebeu-se que são, morfologicamente, similares aos dos concretos sem rejeito, a/c=0,52.
- Concreto com rejeito, a/c=0,52: estrutura tipificada pela presença de carbonato de cálcio de tamanho reduzido tal como aquela observada em concreto com rejeito, a/c=0,63. Igualmente, em relação ao CSH e etringitas observados, percebeu-se que são, morfologicamente, similares aos dos concretos sem rejeito, a/c=0,52.

Como comentários adicionais, há de se destacar que a literatura consultada, de modo geral, faz referência aos seguintes comportamentos/tendências:

- O fator a/c interfere nas características da zona de transição;
- Maior fator a/c conduz a zonas de transição com mais vazios, menos populosas, e vice-versa;
- Maior ø do agregado conduz a zonas de transição com mais vazios, menos populosas, e vice-versa;
- Por conseguinte, em ambos os casos a densidade da ITZ é inferior em relação ao corpo da matriz (*bulk*), situações que foram identificadas na observação das

imagens, o que, certamente, se deve também aos materiais utilizados nas misturas, com ênfase na sua mineralogia, finura, morfologia do grão, polaridade, etc.

Há registro de nucleação e crescimento de carbonato de cálcio a partir dos finos do rejeito em zonas de transição. Observam-se cristais de $CaCO_3$, morfologicamente modificados, apresentados mais arredondados.

A presença da goethita contribui para a redução no tamanho dos cristais formados, sobretudo em zona de transição.

Comparativamente, pode-se perceber que a presença de cristais de minério gera uma microestrutura refinada de grãos mais finos, mantendo a morfologia típica de cada um dos cristais.

A portlandita foi observada em todas as amostras, com morfologia típica e, comumente, muito adensada nas zonas de transição, fato que, motivado pela idade, propiciou a precipitação de carbonatos de cálcio mais refinados.

7.2.3. Ensaios comparativos das resistências à compressão simples

Dos corpos de prova moldados e descritos em 7.2, foram separados aleatoriamente aqueles que seriam direcionados aos ensaios de resistência à compressão axial simples, de acordo com a NBR 5739 – 2007, os quais foram preparados em equipamento retificador para corpos de prova de concreto (marca Contenco), de forma a manter suas superfícies de topo suficientemente lisas e paralelas, após o que foram levados à prensa Emic, de capacidade 200t, para sua ruptura.

As Figuras 7.145 a 7.147 ilustram fase dos procedimentos em ambos os concretos produzidos.

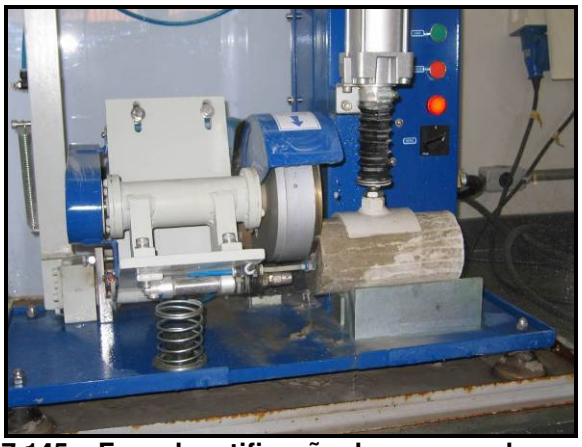


Figura 7.145 – Fase de retificação dos corpos de prova do concreto
Fonte: O autor, 2015.



Figura 7.146 – Detalhe das faces retificadas dos corpos de prova dos concretos
Fonte: O autor, 2015.



Figura 7.147 – Ensaio de um dos corpos de prova do concreto sem o rejeito
Fonte: O autor, 2015.

As Tabelas 7.24 a 7.26 apresentam os valores dos ensaios de resistência à compressão simples obtidos nos concretos analisados, com um e outro tipo de agregado e os cimentos utilizados (CP II – E 32 e CP IV – 40 RS).

Tabela 7.24 – Ensaios comparativos de resistência à compressão simples – CP II – E 32, a/c = 0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - CP II E-32				
Refer. / CP's	Idade do CP	Carga Ruptura (kgf)	Tensão de Compressão Simples (MPa)	
Refer. 1 S/ rejeito	14 dias	21.403	27,25	**28,34**
Refer. 2 S/ rejeito		22.118	28,16	
Refer. 3 S/ rejeito		23.091	29,40	
Refer. 4 S/ rejeito		22.392	28,51	
Refer. 5 S/ rejeito		21.677	27,60	
Refer. 6 S/ rejeito		22.871	29,12	
Teste 1 C/ rejeito	14 dias	17.357	22,10	**20,59**
Teste 2 C/ rejeito		16.533	21,05	
Teste 3 C/ rejeito		15.802	20,12	
Teste 4 C/ rejeito		15.716	20,01	
Teste 5 C/ rejeito		15.551	19,80	
Teste 6 C/ rejeito		16.054	20,44	
Refer. 1 S/ rejeito	28 dias	27.103	34,51	**34,08**
Refer. 2 S/ rejeito		26.811	34,14	
Refer. 3 S/ rejeito		25.788	32,83	
Refer. 4 S/ rejeito		28.032	35,69	
Refer. 5 S/ rejeito		25.572	32,56	
Refer. 6 S/ rejeito		27.300	34,76	
Teste 1 C/ rejeito	28 dias	25.117	31,98	**31,70**
Teste 2 C/ rejeito		24.800	31,58	
Teste 3 C/ rejeito		24.765	31,53	
Teste 4 C/ rejeito		24.733	31,49	
Teste 5 C/ rejeito		24.963	31,78	
Teste 6 C/ rejeito		25.022	31,86	
Refer. 1 S/ rejeito	90 dias	27.568	35,10	**34,71**
Refer. 2 S/ rejeito		28.628	36,45	
Refer. 3 S/ rejeito		25.227	32,12	
Refer. 4 S/ rejeito		25.565	32,55	
Refer. 5 S/ rejeito		27.489	35,00	
Refer. 6 S/ rejeito		29.099	37,05	
Teste 1 C/ rejeito	90 dias	26.233	33,40	**32,42**
Teste 2 C/ rejeito		27.096	34,50	
Teste 3 C/ rejeito		27.505	35,02	
Teste 4 C/ rejeito		26.028	33,14	
Teste 5 C/ rejeito		23.625	30,08	
Teste 6 C/ rejeito		22.269	28,35	
Refer. 1 S/ rejeito	180 dias	28.100	35,78	**36,68**
Refer. 2 S/ rejeito		28.904	36,80	
Refer. 3 S/ rejeito		28.985	36,90	
Refer. 4 S/ rejeito		29.010	36,94	
Refer. 5 S/ rejeito		27.813	35,41	
Refer. 6 S/ rejeito		30.020	38,22	
Teste 1 C/ rejeito	180 dias	27.749	35,33	**35,71**
Teste 2 C/ rejeito		28.090	35,77	
Teste 3 C/ rejeito		26.951	34,31	
Teste 4 C/ rejeito		27.980	35,63	
Teste 5 C/ rejeito		29.930	38,11	
Teste 6 C/ rejeito		27.573	35,11	
FATOR ÁGUA/CIMENTO (a/c) = 0,63				

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.25 – Ensaios comparativos de resistência à compressão simples – CP IV – 40 RS, a/c = 0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - CP IV-40 RS				
Refer. / CP's	Idade do CP	Carga Ruptura (kgf)	Tensão de Compressão Simples (MPa)	
Refer. 1 S/ rejeito	14 dias	22.321	28,42	28,90
Refer. 2 S/ rejeito		24.063	30,64	
Refer. 3 S/ rejeito		20.917	26,63	
Refer. 4 S/ rejeito		22.784	29,01	
Refer. 5 S/ rejeito		23.003	29,29	
Refer. 6 S/ rejeito		23.112	29,43	
Teste 1 C/ rejeito	14 dias	21.354	27,19	27,16
Teste 2 C/ rejeito		21.620	27,53	
Teste 3 C/ rejeito		20.037	25,51	
Teste 4 C/ rejeito		21.300	27,12	
Teste 5 C/ rejeito		23.038	29,33	
Teste 6 C/ rejeito		20.618	26,25	
Refer. 1 S/ rejeito	28 dias	25.873	32,94	32,23
Refer. 2 S/ rejeito		26.072	33,20	
Refer. 3 S/ rejeito		24.922	31,73	
Refer. 4 S/ rejeito		25.117	31,98	
Refer. 5 S/ rejeito		24.800	31,58	
Refer. 6 S/ rejeito		25.104	31,96	
Teste 1 C/ rejeito	28 dias	23.416	29,81	30,60
Teste 2 C/ rejeito		23.910	30,44	
Teste 3 C/ rejeito		22.908	29,17	
Teste 4 C/ rejeito		23.420	29,82	
Teste 5 C/ rejeito		25.439	32,39	
Teste 6 C/ rejeito		25.096	31,95	
Refer. 1 S/ rejeito	90 dias	26.900	34,25	34,49
Refer. 2 S/ rejeito		26.980	34,35	
Refer. 3 S/ rejeito		27.890	35,51	
Refer. 4 S/ rejeito		26.100	33,23	
Refer. 5 S/ rejeito		27.000	34,38	
Refer. 6 S/ rejeito		27.670	35,23	
Teste 1 C/ rejeito	90 dias	24.607	31,33	31,97
Teste 2 C/ rejeito		25.020	31,86	
Teste 3 C/ rejeito		24.980	31,81	
Teste 4 C/ rejeito		25.010	31,84	
Teste 5 C/ rejeito		26.093	33,22	
Teste 6 C/ rejeito		24.962	31,78	
Refer. 1 S/ rejeito	180 dias	26.090	33,22	33,82
Refer. 2 S/ rejeito		25.708	32,73	
Refer. 3 S/ rejeito		26.675	33,96	
Refer. 4 S/ rejeito		27.100	34,50	
Refer. 5 S/ rejeito		27.913	35,54	
Refer. 6 S/ rejeito		25.890	32,96	
Teste 1 C/ rejeito	180 dias	26.104	33,24	32,67
Teste 2 C/ rejeito		25.923	33,01	
Teste 3 C/ rejeito		26.095	33,23	
Teste 4 C/ rejeito		25.080	31,93	
Teste 5 C/ rejeito		25.877	32,95	
Teste 6 C/ rejeito		24.891	31,69	
FATOR ÁGUA/CIMENTO (a/c) = 0,63				

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.26 – Ensaios comparativos de resistência à compressão simples – CP IV – 40 RS, a/c = 0,52

ENSAIO COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - CP IV-40 RS				
Refer. / CP's	Idade do CP	Carga Ruptura (kgf)	Tensão de Compressão Simples (MPa)	
Refer. 1 S/ rejeito	14 dias	37.678	47,97	44,95
Refer. 2 S/ rejeito		34.010	43,30	
Refer. 3 S/ rejeito		34.809	44,32	
Refer. 4 S/ rejeito		34.133	43,46	
Refer. 5 S/ rejeito		36.325	46,25	
Refer. 6 S/ rejeito		34.851	44,37	
Teste 1 C/ rejeito	14 dias	39.713	50,56	47,10
Teste 2 C/ rejeito		34.615	44,07	
Teste 3 C/ rejeito		37.801	48,13	
Teste 4 C/ rejeito		34.528	43,96	
Teste 5 C/ rejeito		35.921	45,74	
Teste 6 C/ rejeito		39.371	50,13	
Refer. 1 S/ rejeito	28 dias	38.112	48,53	47,95
Refer. 2 S/ rejeito		37.950	48,32	
Refer. 3 S/ rejeito		35.402	45,08	
Refer. 4 S/ rejeito		38.618	49,17	
Refer. 5 S/ rejeito		36.751	46,79	
Refer. 6 S/ rejeito		39.145	49,84	
Teste 1 C/ rejeito	28 dias	43.460	55,33	52,69
Teste 2 C/ rejeito		39.615	50,44	
Teste 3 C/ rejeito		40.519	51,59	
Teste 4 C/ rejeito		41.901	53,35	
Teste 5 C/ rejeito		39.206	49,92	
Teste 6 C/ rejeito		43.613	55,53	
Refer. 1 S/ rejeito	90 dias	36.000	45,84	48,51
Refer. 2 S/ rejeito		40.000	50,93	
Refer. 3 S/ rejeito		39.113	49,80	
Refer. 4 S/ rejeito		39.364	50,12	
Refer. 5 S/ rejeito		37.817	48,15	
Refer. 6 S/ rejeito		36.325	46,25	
Teste 1 C/ rejeito	90 dias	42.800	54,49	52,74
Teste 2 C/ rejeito		43.707	55,65	
Teste 3 C/ rejeito		42.008	53,49	
Teste 4 C/ rejeito		39.926	50,84	
Teste 5 C/ rejeito		37.258	47,44	
Teste 6 C/ rejeito		42.813	54,51	
Refer. 1 S/ rejeito	180 dias	38.123	48,54	49,17
Refer. 2 S/ rejeito		37.469	47,71	
Refer. 3 S/ rejeito		38.016	48,40	
Refer. 4 S/ rejeito		40.213	51,20	
Refer. 5 S/ rejeito		39.434	50,21	
Refer. 6 S/ rejeito		38.470	48,98	
Teste 1 C/ rejeito	180 dias	43.694	55,63	53,41
Teste 2 C/ rejeito		40.100	51,06	
Teste 3 C/ rejeito		43.050	54,81	
Teste 4 C/ rejeito		41.962	53,43	
Teste 5 C/ rejeito		43.235	55,05	
Teste 6 C/ rejeito		39.630	50,46	
FATOR ÁGUA/CIMENTO (a/c) = 0,52				

Fonte: O autor, 2015.

7.2.4. Ensaios comparativos das resistências à tração por compressão diametral

Dos corpos de prova moldados e descritos em 7.2 foram separados também, aleatoriamente, aqueles que seriam direcionados aos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 – 2011. Esse ensaio não requer qualquer preparação especial dos corpos de prova, que são rompidos por meio de dispositivo específico introduzido na prensa usual para ruptura por compressão axial. Como nos demais ensaios, buscou-se com este teste avaliar possíveis diferenças de comportamento devidas à natureza dos agregados utilizados. A Figura 7.148 ilustra uma fase da realização dos ensaios.

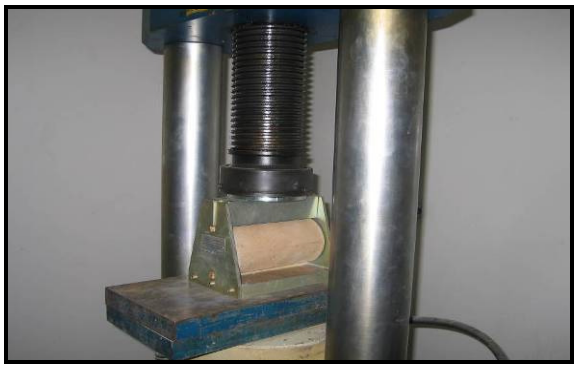


Figura 7.148 – Ensaio de um dos corpos de prova do concreto com rejeito
Fonte: O autor, 2015.

As Tabelas 7.27 a 7.29 apresentam os valores dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral obtidos nos concretos analisados, com um e outro tipo de agregado e os cimentos utilizados (CP II – E 32 e CP IV – 40 RS).

Tabela 7.27 – Ensaios comparativos de tração por compressão diametral – CP II E-32, a/c = 0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - CP II E-32				
Refer. / CP's	Idade do CP	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão de Tração por Compressão Diametral (MPa)	
Refer. 1 S/ rejeito	28 dias	10.445,0	3,32	
Refer. 2 S/ rejeito	28 dias	9.574,0	3,05	
Refer. 3 S/ rejeito	28 dias	8.900,0	2,83	**3,11**
Refer. 4 S/ rejeito	28 dias	9.987,0	3,18	
Refer. 5 S/ rejeito	28 dias	10.001,0	3,18	
Refer. 6 S/ rejeito	28 dias	9.786,0	3,11	
Teste 1 C/ rejeito	28 dias	10.385,0	3,31	
Teste 2 C/ rejeito	28 dias	9.971,0	3,17	
Teste 3 C/ rejeito	28 dias	8.910,0	2,84	**3,08**
Teste 4 C/ rejeito	28 dias	9.012,0	2,87	
Teste 5 C/ rejeito	28 dias	9.812,0	3,12	
Teste 6 C/ rejeito	28 dias	9.987,0	3,18	
Refer. 1 S/ rejeito	90 dias	10.409,0	3,31	
Refer. 2 S/ rejeito	90 dias	10.490,0	3,34	
Refer. 3 S/ rejeito	90 dias	11.001,0	3,50	**3,39**
Refer. 4 S/ rejeito	90 dias	9.900,0	3,15	
Refer. 5 S/ rejeito	90 dias	10.980,0	3,50	
Refer. 6 S/ rejeito	90 dias	11.030,0	3,51	
Teste 1 C/ rejeito	90 dias	12.186,0	3,88	
Teste 2 C/ rejeito	90 dias	14.110,0	4,49	
Teste 3 C/ rejeito	90 dias	13.120,0	4,18	**4,28**
Teste 4 C/ rejeito	90 dias	12.890,0	4,10	
Teste 5 C/ rejeito	90 dias	13.790,0	4,39	
Teste 6 C/ rejeito	90 dias	14.500,0	4,62	
Refer. 1 S/ rejeito	180 dias	11.364,0	3,62	
Refer. 2 S/ rejeito	180 dias	12.011,0	3,82	
Refer. 3 S/ rejeito	180 dias	11.800,0	3,76	**3,79**
Refer. 4 S/ rejeito	180 dias	10.883,0	3,46	
Refer. 5 S/ rejeito	180 dias	12.340,0	3,93	
Refer. 6 S/ rejeito	180 dias	13.004,0	4,14	
Teste 1 C/ rejeito	180 dias	12.560,0	4,00	
Teste 2 C/ rejeito	180 dias	10.913,0	3,47	
Teste 3 C/ rejeito	180 dias	9.876,0	3,14	**3,46**
Teste 4 C/ rejeito	180 dias	9.980,0	3,18	
Teste 5 C/ rejeito	180 dias	11.090,0	3,53	
Teste 6 C/ rejeito	180 dias	10.870,0	3,46	
FATOR ÁGUA/CIMENTO (a/c) = 0,63				

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.28 – Ensaios comparativos de tração por compressão diametral – CP IV - 40 RS, a/c = 0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - CP IV 40 RS				
Refer. / CP's	Idade do CP	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão de Tração por Compressão Diametral (MPa)	
Refer. 1 S/ rejeito	28 dias	11.445,0	3,64	
Refer. 2 S/ rejeito	28 dias	12.347,0	3,93	
Refer. 3 S/ rejeito	28 dias	10.113,0	3,22	3,52
Refer. 4 S/ rejeito	28 dias	11.202,0	3,57	
Refer. 5 S/ rejeito	28 dias	10.317,0	3,28	
Refer. 6 S/ rejeito	28 dias	10.983,0	3,50	
Teste 1 C/ rejeito	28 dias	11.385,0	3,62	
Teste 2 C/ rejeito	28 dias	9.971,0	3,17	
Teste 3 C/ rejeito	28 dias	11.910,0	3,79	3,42
Teste 4 C/ rejeito	28 dias	9.801,0	3,12	
Teste 5 C/ rejeito	28 dias	11.302,0	3,60	
Teste 6 C/ rejeito	28 dias	10.087,0	3,21	
Refer. 1 S/ rejeito	90 dias	12.496,0	3,98	
Refer. 2 S/ rejeito	90 dias	11.821,0	3,76	
Refer. 3 S/ rejeito	90 dias	9.434,0	3,00	3,70
Refer. 4 S/ rejeito	90 dias	11.636,0	3,70	
Refer. 5 S/ rejeito	90 dias	13.721,0	4,37	
Refer. 6 S/ rejeito	90 dias	10.568,0	3,36	
Teste 1 C/ rejeito	90 dias	10.875,0	3,46	
Teste 2 C/ rejeito	90 dias	11.800,0	3,76	
Teste 3 C/ rejeito	90 dias	9.900,0	3,15	3,66
Teste 4 C/ rejeito	90 dias	11.250,0	3,58	
Teste 5 C/ rejeito	90 dias	12.137,0	3,86	
Teste 6 C/ rejeito	90 dias	13.100,0	4,17	
Refer. 1 S/ rejeito	180 dias	11.364,0	3,62	
Refer. 2 S/ rejeito	180 dias	12.011,0	3,82	
Refer. 3 S/ rejeito	180 dias	11.800,0	3,76	3,80
Refer. 4 S/ rejeito	180 dias	11.113,0	3,54	
Refer. 5 S/ rejeito	180 dias	12.340,0	3,93	
Refer. 6 S/ rejeito	180 dias	13.004,0	4,14	
Teste 1 C/ rejeito	180 dias	11.752,0	3,74	
Teste 2 C/ rejeito	180 dias	12.047,0	3,83	
Teste 3 C/ rejeito	180 dias	12.021,0	3,83	3,79
Teste 4 C/ rejeito	180 dias	11.633,0	3,70	
Teste 5 C/ rejeito	180 dias	11.787,0	3,75	
Teste 6 C/ rejeito	180 dias	12.167,0	3,87	
FATOR ÁGUA/CIMENTO (a/c) = 0,63				

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.29 – Ensaios comparativos de tração por compressão diametral – CP IV - 40 RS, a/c = 0,52

ENSAIO COMPARATIVO DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL - CP IV 40 RS				
Refer. / CP's	Idade do CP	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão de Tração por Compressão Diametral (MPa)	
Refer. 1 S/ rejeito	28 dias	14.645,0	4,66	
Refer. 2 S/ rejeito	28 dias	13.921,0	4,43	
Refer. 3 S/ rejeito	28 dias	14.850,0	4,73	4,48
Refer. 4 S/ rejeito	28 dias	13.202,0	4,20	
Refer. 5 S/ rejeito	28 dias	13.517,0	4,30	
Refer. 6 S/ rejeito	28 dias	14.378,0	4,58	
Teste 1 C/ rejeito	28 dias	15.385,0	4,90	
Teste 2 C/ rejeito	28 dias	15.910,0	5,06	
Teste 3 C/ rejeito	28 dias	16.204,0	5,16	5,13
Teste 4 C/ rejeito	28 dias	16.581,0	5,28	
Teste 5 C/ rejeito	28 dias	15.802,0	5,03	
Teste 6 C/ rejeito	28 dias	16.832,0	5,36	
Refer. 1 S/ rejeito	90 dias	14.496,0	4,61	
Refer. 2 S/ rejeito	90 dias	14.821,0	4,72	
Refer. 3 S/ rejeito	90 dias	13.995,0	4,45	4,60
Refer. 4 S/ rejeito	90 dias	15.180,0	4,83	
Refer. 5 S/ rejeito	90 dias	14.721,0	4,69	
Refer. 6 S/ rejeito	90 dias	13.568,0	4,32	
Teste 1 C/ rejeito	90 dias	16.875,0	5,37	
Teste 2 C/ rejeito	90 dias	15.914,0	5,07	
Teste 3 C/ rejeito	90 dias	16.477,0	5,24	5,24
Teste 4 C/ rejeito	90 dias	16.250,0	5,17	
Teste 5 C/ rejeito	90 dias	17.011,0	5,41	
Teste 6 C/ rejeito	90 dias	16.303,0	5,19	
Refer. 1 S/ rejeito	180 dias	14.364,0	4,57	
Refer. 2 S/ rejeito	180 dias	15.011,0	4,78	
Refer. 3 S/ rejeito	180 dias	13.800,0	4,39	4,61
Refer. 4 S/ rejeito	180 dias	13.413,0	4,27	
Refer. 5 S/ rejeito	180 dias	14.340,0	4,56	
Refer. 6 S/ rejeito	180 dias	16.004,0	5,09	
Teste 1 C/ rejeito	180 dias	16.752,0	5,33	
Teste 2 C/ rejeito	180 dias	17.324,0	5,51	
Teste 3 C/ rejeito	180 dias	16.421,0	5,23	5,31
Teste 4 C/ rejeito	180 dias	16.633,0	5,29	
Teste 5 C/ rejeito	180 dias	17.032,0	5,42	
Teste 6 C/ rejeito	180 dias	15.967,0	5,08	
FATOR ÁGUA/CIMENTO (a/c) = 0,52				

Fonte: O autor, 2015.

7.2.5. Ensaios comparativos dos módulos de elasticidade dinâmicos

Dos corpos de prova moldados e descritos em 7.2 foram separados também, aleatoriamente, aqueles que seriam direcionados aos ensaios do módulo de elasticidade dinâmico, segundo a norma ASTM C215 - 2008. Este ensaio não requer qualquer preparação especial dos corpos de prova, que são apenas medidos, pesados e submetidos por meio de equipamento e método específicos ao ensaio de frequência ressonante. Buscou-se com este teste avaliar a frequência natural de vibração do material e as possíveis diferenças de comportamento devidas também à natureza dos agregados utilizados, tendo em vista as condições de porosidade do agregado rejeito, que certamente interfeririam de alguma forma sobre a propagação das ondas do ensaio ao longo do corpo de prova.

Nestas análises foi utilizado do aparelho ERUDITE MK II - *Resonant Frequency Test*, sendo o módulo de elasticidade dinâmico dado pela equação

$$Ed = 4n^2.L^2.\rho.10^{-12} \ \ (MPa) \qquad (7.1)$$

onde:

n = Frequência longitudinal ressonante (Hertz)
L = Comprimento do CP (mm)
ρ = Densidade (Kg/dm3)

As Figuras 7.149 e 7.150 ilustram fases da realização dos ensaios.

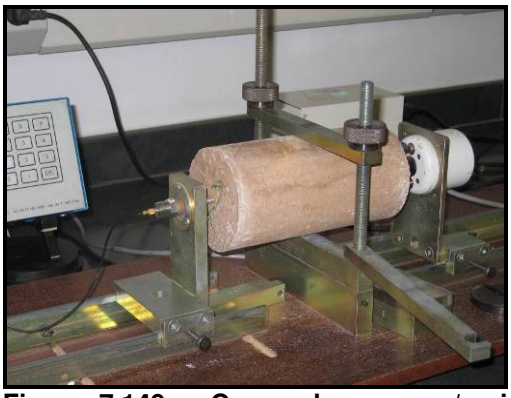


Figura 7.149 – Corpo de prova c/ rejeito posicionado no equipamento Erudite MKII – Resonant Frequency Test para o ensaio



Figura 7.150 – Módulo de leitura do equipamento Erudite MKII – Resonant Frequency Test

Fonte: O autor, 2015.

As Tabelas 7.30 a 7.32 apresentam os valores dos ensaios do módulo de elasticidade dinâmico obtidos nos concretos analisados, com um e outro tipo de agregado e os cimentos utilizados (CP II – E 32 e CP IV – 40 RS).

Tabela 7.30 – Ensaios comparativos do módulo de elasticidade dinâmico – CPII E-32

ENSAIO COMPARATIVO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - CP II E-32 - a/c = 0,63							
Refer. / CP's	Idade do CP	Seção do CP (cm)	Volume do CP (m³)	Peso do CP (gr)	Frequência de leitura (Khz)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)	(GPa)
Refer. 1 S/rejeito	28 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.670,10	9,88	36.510,02	36,33
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.633,20	9,88	36.142,94	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.730,30	9,02	30.929,80	31,12
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.751,30	9,05	31.311,17	
Refer. 1 S/rejeito	90 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.547,00	9,59	33.244,42	33,09
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.515,00	9,59	32.944,50	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.726,00	8,77	29.205,35	29,75
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.726,80	8,93	30.287,21	
Refer. 1 S/rejeito	180 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.682,90	9,70	35.314,55	34,90
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.502,50	9,83	34.490,98	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.690,10	8,67	28.268,10	28,77
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.708,20	8,80	29.265,02	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.31 – Ensaios comparativos do módulo de elasticidade dinâmico – CP IV – 40 RS

ENSAIO COMPARATIVO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - CP IV-40 RS - a/c = 0,63							
Refer. / CP's	Idade do CP	Seção do CP (cm)	Volume do CP (m³)	Peso do CP (gr)	Frequência de leitura (Khz)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)	(GPa)
Refer. 1 S/rejeito	28 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.520,98	9,40	31.705,86	31,22
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.509,00	9,27	30.730,04	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.587,90	9,17	30.746,76	30,16
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.590,30	8,99	29.571,30	
Refer. 1 S/rejeito	90 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.521,10	9,69	33.693,51	34,42
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.532,20	9,88	35.138,20	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.653,10	9,05	30.491,52	30,26
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.687,40	8,94	30.034,17	
Refer. 1 S/rejeito	180 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.652,60	9,60	34.305,59	34,56
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.754,40	9,54	34.822,31	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.517,40	8,93	28.585,45	28,64
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.562,70	8,89	28.694,79	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.32 – Ensaios comparativos do módulo de elasticidade dinâmico – CP IV – 40 RS

ENSAIO COMPARATIVO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO - CP IV-40 RS - a/c = 0,52							
Refer. / CP's	Idade do CP	Seção do CP (cm)	Volume do CP (m³)	Peso do CP (gr)	Frequência de leitura (Khz)	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)	(GPa)
Refer. 1 S/rejeito	28 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.631,10	10,09	37.673,93	36,88
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.540,90	10,00	36.085,61	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.843,30	9,40	34.608,30	34,59
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.848,50	9,39	34.581,43	
Refer. 1 S/rejeito	90 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.621,30	10,10	37.646,76	37,70
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.632,20	10,10	37.760,07	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.853,10	9,47	35.215,23	35,37
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.862,00	9,50	35.520,56	
Refer. 1 S/rejeito	180 dias	Ø10 x 20	0,00157	3.641,80	10,09	37.784,94	37,81
Refer. 2 S/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.645,70	10,09	37.825,41	
Teste 1 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.895,20	9,55	36.204,02	36,11
Teste 2 C/rejeito		Ø10 x 20	0,00157	3.867,40	9,56	36.020,95	

Fonte: O autor, 2015.

7.2.6. Ensaios comparativos das resistências à abrasão seca

Dois corpos de prova moldados e descritos em 7.2 foram separados ao acaso, direcionados aos ensaios de abrasão seca. Foram preparados em corte transversal ao seu eixo longitudinal, formando segmentos cilíndricos com espessura de 5cm. Estes segmentos foram constituídos de forma que cada um foi preparado a partir de um único corpo de prova. Posteriormente, tais segmentos foram cortados em cubos com cerca de 7cm de lado.

A Figura 7.151 ilustra uma fase dos procedimentos em ambos os concretos produzidos.



Figura 7.151 – Amostras dos concretos prontas para o ensaio de abrasão seca
Fonte: O autor, 2015.

Foram utilizados princípios da Norma Brasileira ABNT NBR 12.042, que se referem à determinação do desgaste por abrasão de materiais inorgânicos, com uma adaptação conveniente de mensuração dos desgastes por perda de peso. Foram medidos, por meio de balança e expressos em porcentagem do peso inicial, os desgastes parciais, correspondentes a 250 voltas do disco abrasivo, equivalentes a 500m, e o desgaste total, correspondente a 500 voltas do disco abrasivo, equivalentes a 1000m. Em ambos os estágios os valores absolutos dos desgastes foram expressos em perda de massa dos corpos de prova, calculados pela fórmula

$$d = \frac{m_i - m_0}{m_0} * 100 \tag{7.2}$$

onde:

- $d =$ desgaste expresso em percentual de perda de massa;
- $m_i =$ massa do corpo de prova após estagio parcial ou total, em gramas;
- $m_0 =$ massa inicial do corpo de prova, em gramas.

Para a análise dos resultados calculou-se também o desgaste médio apresentado pelos corpos de prova após o estágio final, de 500 voltas do disco abrasivo.

A Figura 7.152 ilustra o equipamento utilizado no ensaio, o abrasímetro Amsler, marca Pavitest, de fabricação da Contenco Ind. e Com. Ltda., durante a execução dos testes com cada amostra de concreto preparada.



Figura 7.152 – Etapa do ensaio de abrasão seca em amostra do concreto s/rejeito
Fonte: O autor, 2015.

As Tabelas 7.33 a 7.44 apresentam os valores dos ensaios de abrasão seca obtidos nos concretos analisados, com um e outro tipo de agregado e os cimentos utilizados.

Tabela 7.33 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (28 dias) – CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - SEM REJEITO (28 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	345,10	322,10	6,66	6,80	299,00	13,36	13,88
2	359,00	334,10	6,94		307,30	14,40	
3	351,15	327,62	6,70		299,37	14,75	
4	357,30	332,61	6,91		310,83	13,01	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.34 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (28 dias) – CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - COM REJEITO (28 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	431,00	409,70	4,94	4,33	392,30	8,98	8,72
2	408,50	393,30	3,72		373,90	8,47	
3	456,17	436,69	4,27		415,15	8,99	
4	459,16	439,01	4,39		420,42	8,44	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.35 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (90 dias) – CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - SEM REJEITO (90 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	431,82	407,08	5,73	5,64	386,50	10,50	10,13
2	433,66	409,54	5,56		391,28	9,77	
3	434,70	410,32	5,61		389,95	10,29	
4	442,80	417,80	5,65		398,63	9,98	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.36 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (90 dias) – CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - COM REJEITO (90 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	442,07	417,00	5,67	5,89	410,55	7,13	9,13
2	461,89	433,60	6,12		410,46	11,13	
3	437,07	410,78	6,02		398,66	8,79	
4	451,13	425,15	5,76		408,34	9,49	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.37 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - SEM REJEITO (28 dias) - CP IV 40 - RS - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	435,12	414,32	4,78	4,82	384,85	11,55	11,01
2	359,76	344,86	4,14		319,65	11,15	
3	417,18	400,74	3,94		372,05	10,82	
4	389,21	364,22	6,42		348,25	10,52	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.38 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - COM REJEITO (28 dias) - CP IV 40 - RS - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	444,12	414,00	6,78	6,85	398,00	10,38	10,71
2	446,90	415,60	7,00		401,23	10,22	
3	450,90	420,13	6,82		408,90	9,31	
4	461,20	429,97	6,77		401,67	12,91	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.39 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - SEM REJEITO (90 dias) - CP IV 40 - RS - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	512,68	490,08	4,41	4,76	465,74	9,16	9,98
2	510,83	484,70	5,12		455,64	10,80	
3	579,89	553,09	4,62		524,61	9,53	
4	578,78	550,51	4,88		518,38	10,44	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.40 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - COM REJEITO (90 dias) - CP IV 40-RS - a/c = 0,63							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	573,53	544,70	5,03	4,82	516,88	9,88	10,05
2	504,23	480,99	4,61		452,84	10,19	
3	576,90	547,85	5,04		519,56	9,94	
4	575,80	549,35	4,59		517,12	10,19	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.41 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - SEM REJEITO (28 dias) - CP IV 40 - RS - a/c = 0,52							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	601,40	594,72	1,11	1,66	591,88	1,58	2,63
2	566,83	556,38	1,84		548,64	3,21	
3	501,94	491,62	2,06		491,30	2,12	
4	553,79	544,79	1,63		533,81	3,61	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.42 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (28 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - COM REJEITO (28 dias) - CP IV 40 - RS - a/c = 0,52							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	690,23	678,82	1,65	1,92	669,93	2,94	3,58
2	630,02	618,40	1,84		608,70	3,38	
3	613,77	600,23	2,21		596,25	2,85	
4	651,82	638,82	1,99		618,39	5,13	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.43 – Ensaios de abrasão seca – Sem Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - SEM REJEITO (90 dias) - CP IV 40 - RS - a/c = 0,52							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	555,18	550,18	0,90	1,46	543,12	2,17	2,37
2	565,03	556,85	1,45		555,03	1,77	
3	537,18	527,22	1,85		522,21	2,79	
4	543,52	534,52	1,66		528,57	2,75	

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.44 – Ensaios de abrasão seca – Com Rejeito (90 dias) – CP IV - 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO SECA - COM REJEITO (90 dias) - CP IV 40-RS - a/c = 0,52							
CP	PESO INICIAL (g)	Primeiro ciclo 250 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)	Segundo ciclo 500 giros - peso (g)	Desgaste individual (%)	Desgaste médio (%)
1	662,17	651,31	1,64	1,71	631,90	4,57	3,17
2	623,40	613,41	1,60		609,94	2,16	
3	591,30	580,97	1,75		570,33	3,55	
4	645,00	632,98	1,86		629,50	2,40	

Fonte: O autor, 2015.

7.2.7. Ensaios comparativos das resistências à abrasão hídrica

Para atender a um dos objetivos específicos desta pesquisa foi desenvolvido, pelo autor deste trabalho no Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, o detalhamento e projeto executivo do aparelho descrito pela norma ASTM C 1138 M – *Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*, cujo croquis e projeto constam das Figuras 7.153 e 7.154.

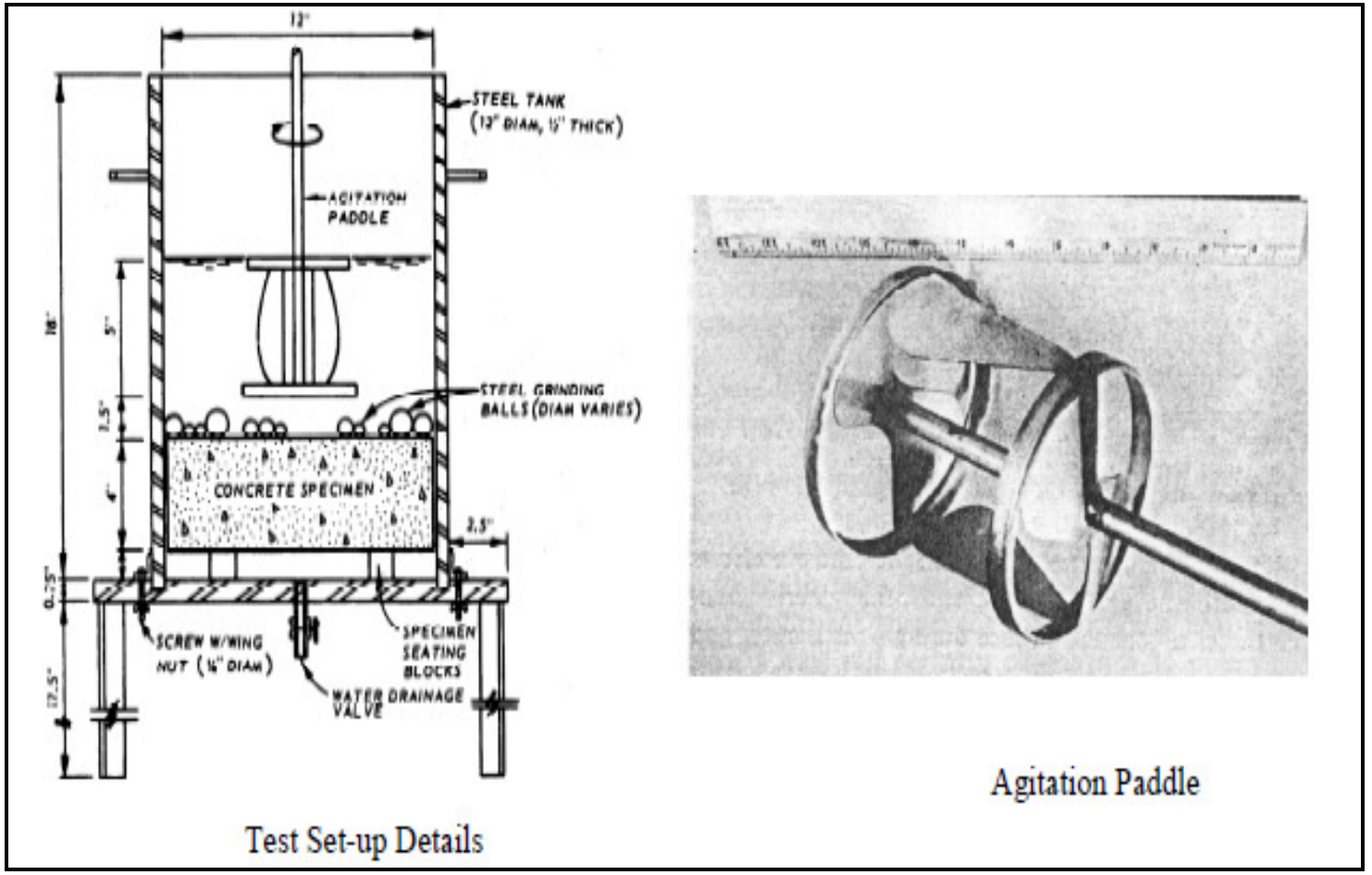


Figura 7.153 – Croquis esquemático do equipamento de abrasão hídrica
Fonte: ASTM 1138 C.

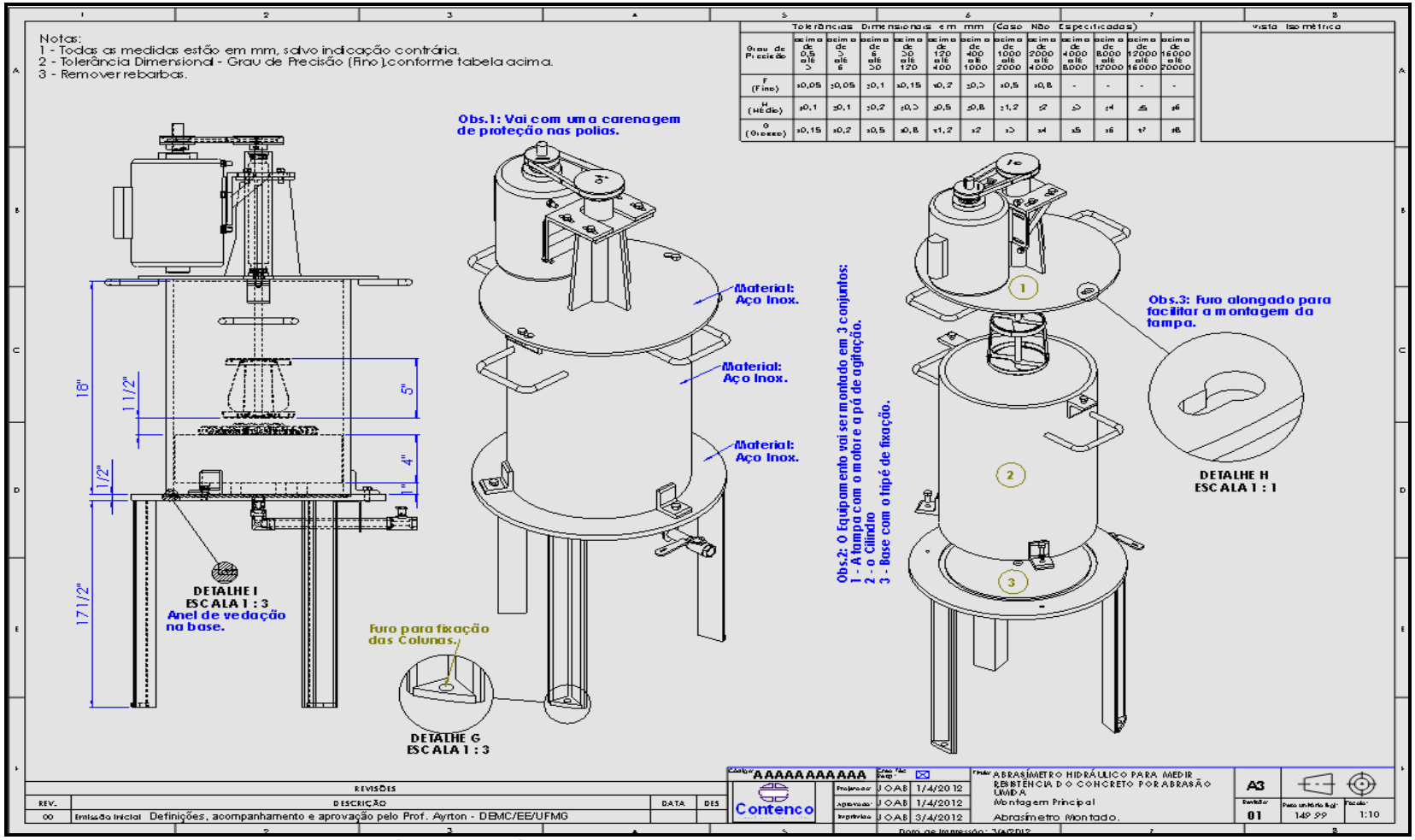


Figura 7.154 – Projeto do abrasímetro hidráulico utilizado
Fonte: Elaborado pelo autor, 2015.

A fabricação do equipamento foi entregue à empresa Contenco para produção da primeira unidade e incorporação deste projeto ao seu *portfolio* de equipamentos. As Figuras 7.155 a 7.158 ilustram o equipamento fabricado e em seguida as fases da realização dos respectivos ensaios.



Figura 7.155 – Cuba do abrasímetro em aço inox



Figura 7.156 – Vista da montagem do CP Ø 30 x 10 na base da cuba



Figura 7.157 – Tampa e conjunto motor do abrasímetro



Figura 7.158 – Equipamento abrasímetro completo, montado em laboratório

Fonte: O autor, 2015.

Dos concretos produzidos e descritos em 7.2, foram moldados também corpos de prova especiais, Ø 30 x 10cm, os quais foram direcionados aos ensaios de resistência

à abrasão hídrica. Este ensaio objetivou verificar a eventual diferença de comportamento deste padrão de concreto pesquisado (consistência plástica) em relação às experiências anteriores com concretos de consistência seca (vibro-prensados) utilizados em peças pré-fabricadas para pavimentação.

Trata-se de um ensaio onde corpos de prova cilíndricos (de 30 cm de diâmetro por 10cm de altura) são submetidos a ciclos de carga abrasiva constituída por esferas de aço de diferentes tamanhos submersas em água. Foram utilizados os princípios da norma americana ASTM C 1138 com pequena alteração simplificadora dos procedimentos, adotando-se o parâmetro "perda de peso" ao invés do de "perda de volume", o que, para fins comparativos, é perfeitamente válido. Após determinado número de ciclos, por determinados tempos, à velocidade do líquido também determinada, os corpos de prova são pesados na condição de *SSS* (saturado de superfície seca) e é estabelecido o índice final de sua abrasão hídrica em termos percentuais da perda de massa verificada (Figura 7.159 a 7.164).



Figura 7.159 – Fase de moldagem dos corpos de prova Ø 30 x 10 dos concretos
Fonte: O autor, 2015.



Figura 7.160 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto s/rejeito após primeiro ciclo



Figura 7.161 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto s/rejeito após ciclo final

Fonte: O autor, 2015.



Figura 7.162 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto c/rejeito após primeiro ciclo



Figura 7.163 – Corpo de prova Ø 30 x 10 do concreto s/rejeito após ciclo final

Fonte: O autor, 2015.



Figura 7.164 – Estado comparativo dos corpos de prova Ø 30 x 10 após ciclos finais

Fonte: O autor, 2015.

A abrasão hídrica de corpo de prova é dada pela equação

$$d = \frac{m_i - m_0}{m_0} * 100 \qquad (7.3)$$

onde:

d = desgaste por abrasão hídrica, expressa em % de perda de massa;
m_i = massa final do corpo de prova saturado de superfície seca (SSS), ao término do último ciclo;
m_0 = massa inicial do corpo de prova saturado de superfície seca (SSS) antes do primeiro ciclo abrasivo.

Aqui cabe esclarecer uma diferença de idade em que os corpos de prova foram efetivamente submetidos aos ciclos dos ensaios. Os ensaios com os **concretos sem o rejeito** sempre foram iniciados nas idades de 30 e 90 dias, respectivamente. Já os ensaios com os **concretos com rejeito**, por conveniências meramente operacionais, face às condições de desenvolvimento dos mesmos, apresentam uma pequena defasagem de cerca de 10/15 dias.

As Tabelas 7.45 a 7.56 apresentam os valores dos ensaios de abrasão hídrica obtidos nos concretos analisados, com um e outro tipo de agregado e os cimentos utilizados.

Tabela 7.45 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (30 dias) CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - SEM REJEITO (30 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	15.970,10 g
1	16.109,20			15.925,50	1,14	PESO SAT. INICIAL	16.109,20 g
2	15.925,30			15.687,30	1,49	PESO SAT. FINAL	14.808,50 g
3	15.683,00	20:00 hs	08:00 hs	15.451,70	1,47	77:25 hs	
4	15.452,30			15.200,40	1,63	Absorç. inicial % = 0,87	
5	15.206,20			15.030,10	1,16		
6	15.031,10			14.808,50	1,48	DESGASTE TOTAL SAT. = 8,07%	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.46 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (41 dias) CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - COM REJEITO (41 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	16.519,40 g
1	16.750,10			16.573,90	1,05	PESO SAT. INICIAL	16.750,10 g
2	16.594,10			16.319,30	1,66	PESO SAT. FINAL	15.189,90 g
3	16.321,00	20:00 hs	08:00 hs	15.980,90	2,08	77:25 hs	
4	15.982,00			15.665,30	1,98	Absorç. inicial % = 1,39	
5	15.665,10			15.386,50	1,78		
6	15.386,60			15.189,90	1,28	DESGASTE TOTAL SAT. = 9,31%	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.47 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (90 dias) CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - SEM REJEITO (90 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	16.470,00 g
1	16.700,10			16.590,50	0,66	PESO SAT. INICIAL	16.700,10 g
2	16.590,10			16.419,00	1,03	PESO SAT. FINAL	15.381,60 g
3	16.419,30	20:00 hs	08:00 hs	16.185,50	1,42	77:00 hs	
4	16.185,50			15.909,70	1,70	Absorç. inicial % = 1,39	
5	15.909,30			15.655,50	1,60		
6	15.656,50			15.381,60	1,76	DESGASTE TOTAL SAT. = 7,89%	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.48 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (105 dias) CP II E-32

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - COM REJEITO (105 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	16.878,50 g
1	17.228,20			17.091,45	0,79	PESO SAT. INICIAL	17.228,20 g
2	17.123,45			16.881,10	1,42	PESO SAT. FINAL	15.771,80 g
3	16.883,65	20:00 hs	08:00 hs	16.598,85	1,69	77:00 hs	
4	16.599,75			16.284,00	1,90	Absorç. inicial % = 2,07	
5	16.285,05			16.017,85	1,64		
6	16.028,90			15.771,80	1,60	DESGASTE TOTAL SAT. = 8,45 %	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.49 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (30 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - SEM REJEITO (30 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	16.220,10 g
1	16.367,70			16.186,00	1,11	PESO SAT. INICIAL	16.367,70 g
2	16.186,10			16.016,10	1,05	PESO SAT. FINAL	14.984,60 g
3	16.016,20	20:00 hs	08:00 hs	15.830,40	1,16	77:25 hs	
4	15.830,40			15.615,10	1,36	Absorç. inicial % = 0,91	
5	15.615,20			15.320,10	1,89		
6	15.320,10			14.984,60	2,19	DESGASTE TOTAL SAT. = 8,45%	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.50 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (44 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - COM REJEITO (44 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	16.739,10 g
1	16.971,80			16.700,30	1,60	PESO SAT. INICIAL	16.971,80 g
2	16.700,40			16.424,80	1,65	PESO SAT. FINAL	15.313,70 g
3	16.424,80	20:00 hs	08:00 hs	16.140,70	1,73	77:25 hs	
4	16.140,80			15.866,40	1,70	Absorç. inicial % = 1,39	
5	15.866,40			15.612,00	1,60		
6	15.612,10			15.313,70	1,91	DESGASTE TOTAL SAT. = 9,77%	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.51 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (90 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - SEM REJEITO (90 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	16.370,60 g
1	16.570,30			16.404,60	1,00	PESO SAT. INICIAL	16.570,30 g
2	16.404,70			16.179,90	1,37	PESO SAT. FINAL	15.195,00 g
3	16.180,00	20:00 hs	08:00 hs	15.950,20	1,42	80:00 hs	
4	15.950,20			15.739,70	1,32	Absorç. inicial % = 1,22	
5	15.739,80			15.480,10	1,65		
6	15.480,10			15.195,00	1,84	DESGASTE TOTAL SAT. = 8,30%	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.52 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (104 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - COM REJEITO (104 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,63						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	16.781,50 g
1	17.130,60			16.974,70	0,91	PESO SAT. INICIAL	17.130,60 g
2	16.974,80			16.730,40	1,44	PESO SAT. FINAL	15.618,00 g
3	16.730,40	20:00 hs	08:00 hs	16.504,50	1,35	80:00 hs	
4	16.504,60			16.250,40	1,54	Absorç. inicial % = 2,08	
5	16.250,40			15.953,00	1,83		
6	15.953,10			15.618,00	2,10	DESGASTE TOTAL SAT. = 8,83%	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.53 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (30 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - SEM REJEITO (30 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,52						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	15.664,80 g
1	15.894,10			15.772,80	0,76	PESO SAT. INICIAL	15.894,10 g
2	15.772,80			15.663,70	0,69	PESO SAT. FINAL	14.878,60 g
3	15.663,80	20:00 hs	08:00 hs	15.328,80	2,14	77:25 hs	
4	15.328,90			15.148,10	1,18	Absorç. inicial % = 1,46	
5	15.148,10			15.021,30	0,84		
6	15.021,30			14.878,60	0,95	DESGASTE TOTAL SAT. = 6,38 %	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.54 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (40 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - COM REJEITO (40 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,52						CICLOS - 12 HORAS	
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	17.533,20 g
1	17.777,00			17.665,60	0,63	PESO SAT. INICIAL	17.777,00 g
2	17.665,70			17.574,40	0,52	PESO SAT. FINAL	16.815,90 g
3	17.574,40	20:00 hs	08:00 hs	17.440,70	0,76	77:25 hs	
4	17.440,70			17.239,30	1,15	Absorç. inicial % = 0,91	
5	17.239,40			17.028,50	1,22		
6	17.028,50			16.815,90	1,25	DESGASTE TOTAL SAT. = 5,40 %	

Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.55 – Ensaios de abrasão hídrica Sem Rejeito (90 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - SEM REJEITO (90 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,52						CICLOS - 12 HORAS		
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	15.780,70	g
1	15.954,30	20:00 hs	08:00 hs	15.853,10	0,63	PESO SAT. INICIAL	15.954,30	g
2	15.853,20			15.704,70	0,94	PESO SAT. FINAL	15.159,77	g
3	15.704,70			15.574,10	0,83	80:00 hs		
4	15.574,10			15.428,60	0,93	Absorç. inicial % = 1,10		
5	15.428,70			15.292,90	0,88			
6	15.292,90			15.159,77	0,87	DESGASTE TOTAL SAT. = 4,98%		
Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo								

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.56 – Ensaios de abrasão hídrica Com Rejeito (102 dias) CP IV – 40 RS

ENSAIO DE ABRASÃO HÍDRICA - COM REJEITO (102 dias) - CP IV-40 RS - a/c = 0,52						CICLOS - 12 HORAS		
CICLO	PESO ANTES CICLO (g)	Início dos ciclos	Término dos ciclos	PESO APÓS CICLO (g)	Dif. (%)	PESO SECO AO AR	17.667,50	g
1	17.934,20	20:00 hs	08:00 hs	17.803,20	0,73	PESO SAT. INICIAL	17.934,20	g
2	17.803,30			17.652,70	0,85	PESO SAT. FINAL	16.999,80	g
3	17.652,70			17.505,10	0,84	80:00 hs		
4	17.505,10			17.324,00	1,03	Absorç. inicial % = 1,51		
5	17.324,10			17.165,80	0,91			
6	17.165,80			16.999,80	0,97	DESGASTE TOTAL SAT. = 5,21%		
Obs: CP mantido submerso nos intervalos de 08:00 às 20:00 hs. antes de cada ciclo								

Fonte: O autor, 2015.

7.2.8. Ensaios comparativos das absorções por capilaridade

Dos corpos de prova moldados e descritos em 7.2 foram separados, também aleatoriamente, aqueles que seriam direcionados aos ensaios de absorção por capilaridade. Este ensaio não requer qualquer preparação especial dos corpos de prova, que são apenas pesados e colocados em uma bandeja com uma lâmina de água mantida constante com 10mm de altura, conforme estabelece a norma LNEC E 393. Em tempos determinados, os corpos de prova são retirados e submetidos à pesagem após rápido procedimento para que sua parte inferior que esteve submersa se encontre na condição de *SSS* (saturada de superfície seca).

A Figura 7.165 ilustra uma fase da realização do ensaio.

$$\text{Coeficiente de Capilaridade aos i minutos} = C = (m_i - m_{10})/S.t^{0,5} \quad (7.4)$$

onde:

m_i = massa do corpo de prova no tempo i;
m_{10} = massa do corpo de prova após 10 minutos de contato na água;
t = tempo em minutos decorrido até o tempo i;
S = área do corpo de prova submerso no ensaio.



Figura 7.165 – Fase durante a execução do ensaio
Fonte: O autor, 2015.

As Tabelas 7.57 a 7.65 apresentam os valores dos ensaios de absorção por capilaridade obtidos nos concretos analisados, com um e outro tipo de agregado, e cimentos utilizados.

Tabela 7.57 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (30 dias) CP II E-32 a/c=0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (30 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	30 dias	3.557,8	**3.562,1**	3.562,6	3.563,4	3.564,2	**3.564,9**	3.569,6	**3.570,4**	**3.570,4**	0,28842	0,2301	0,114846	0,1114
Refer. 2 S/rejeito	30 dias	3.645,0	**3.647,7**	3.648,1	3.648,5	3.649,3	**3.649,7**	3.653,9	**3.655,5**	**3.655,5**	0,19173	g/dm^2.min^{0,5}	0,107928	g/dm^2.min^{0,5}
Teste 1 C/rejeito	30 dias	3.717,2	**3.720,9**	3.721,2	3.722,0	3.722,9	**3.723,5**	3.729,1	**3.731,0**	**3.731,0**	0,24935	0,2924	0,139753	0,1619
Teste 2 C/rejeito	30 dias	3.741,6	**3.746,9**	3.747,3	3.748,3	3.749,4	**3.750,4**	3.758,1	**3.760,2**	**3.760,2**	0,33553	g/dm^2.min^{0,5}	0,184031	g/dm^2.min^{0,5}

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.58 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (90 dias) CP II E-32 a/c=0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (90 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	90 dias	3.689,0	**3.693,5**	3.694,3	3.695,2	3.696,3	**3.696,8**	3.704,9	**3.706,6**	**3.706,6**	0,31635	0,2972	0,181264	0,1660
Refer. 2 S/rejeito	90 dias	3.632,7	**3.635,7**	3.636,3	3.637,1	3.638,2	**3.638,6**	3.646,0	**3.646,7**	**3.646,6**	0,27801	g/dm^2.min^{0,5}	0,150822	g/dm^2.min^{0,5}
Teste 1 C/rejeito	90 dias	3.736,0	**3.740,9**	3.741,4	3.742,7	3.743,5	**3.744,2**	3.753,0	**3.755,1**	**3.755,1**	0,31635	0,3451	0,196484	0,2179
Teste 2 C/rejeito	90 dias	3.702,1	**3.707,7**	3.708,2	3.709,6	3.710,9	**3.711,6**	3.722,1	**3.724,8**	**3.725,0**	0,37387	g/dm^2.min^{0,5}	0,239379	g/dm^2.min^{0,5}

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.59 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (180 dias) CP II E-32 a/c=0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (180 dias) - CP II E-32 - a/c = 0,63														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	180 dias	3.629,9	3.636,5	3.637,5	3.639,1	3.641,7	3.642,8	3.652,4	3.657,9	3.659,2	0,60395	0,5368	0,31410	0,3072
Refer. 2 S/rejeito	180 dias	3.722,6	3.728,8	3.729,3	3.730,4	3.732,8	3.733,7	3.742,6	3.748,5	3.750,5	0,46974	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,300261	$g/dm^2.min^{0,5}$
Teste 1 C/rejeito	180 dias	3.697,4	3.702,1	3.704,2	3.706,4	3.709,7	3.710,9	3.724,0	3.731,4	3.734,9	0,84361	0,7861	0,453851	0,4580
Teste 2 C/rejeito	180 dias	3.719,5	3.727,2	3.728,8	3.731,1	3.733,6	3.734,8	3.748,5	3.756,8	3.760,6	0,72857	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,462153	$g/dm^2.min^{0,5}$

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.60 – Ensaios comparativos de absorção por capilaridade do concreto (30 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (30 dias) - CP II V 40 - RS - a/c = 0,63														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	30 dias	3.571,2	3.575,2	3.575,6	3.576,2	3.578,1	3.578,8	3.586,9	3.590,0	3.590,0	0,34511	0,3978	0,20479	0,1771
Refer. 2 S/rejeito		3.585,4	3.590,6	3.592,2	3.593,3	3.594,4	3.595,3	3.598,2	3.600,8	3.601,4	0,45057	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,14944	$g/dm^2.min^{0,5}$
Teste 1 C/rejeito		3.691,1	3.703,2	3.703,7	3.707,1	3.710,0	3.711,3	3.717,2	3.719,1	3.724,3	0,77651	0,7717	0,29196	0,2906
Teste 2 C/rejeito		3.690,4	3.704,8	3.706,7	3.709,2	3.711,6	3.712,8	3.718,8	3.721,4	3.725,7	0,76692	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,28919	$g/dm^2.min^{0,5}$

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.61 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (90 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (90 dias) - CP IV 40 - RS - a/c - 0,63														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	90 dias	3.556,0	3.561,9	3.562,7	3.563,3	3.564,4	3.566,8	3.573,1	3.577,5	3.577,6	0,46974	0,4602	0,21724	0,1979
Refer. 2 S/rejeito		3.579,9	3.584,3	3.585,3	3.586,4	3.587,0	3.589,0	3.594,3	3.597,1	3.597,2	0,45057	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,17850	$g/dm^2.min^{0,5}$
Teste 1 C/rejeito		3.641,3	3.654,9	3.656,6	3.657,8	3.659,5	3.664,6	3.674,7	3.676,9	3.677,9	0,92989	0,9443	0,31825	0,3286
Teste 2 C/rejeito		3.639,7	3.648,5	3.650,9	3.652,8	3.654,3	3.658,5	3.669,4	3.671,9	3.673,0	0,958649	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,33900	$g/dm^2.min^{0,5}$

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.62 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (180 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,63

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (180 dias) - CP II 40 - RS - a/c = 0,63														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	180 dias	3.496,9	3.502,5	3.503,3	3.504,0	3.504,7	3.505,2	3.519,3	3.526,2	3.530,1	0,25884	0,2828	0,38190	0,3099
Refer. 2 S/rejeito		3.554,7	3.559,5	3.560,6	3.561,5	3.562,2	3.562,7	3.571,0	3.575,4	3.576,7	0,30677	g/dm^2.min^{0,5}	0,23799	g/dm^2.min^{0,5}
Teste 1 C/rejeito		3.625,5	3.636,4	3.638,6	3.640,4	3.641,8	3.643,1	3.662,4	3.671,2	3.677,4	0,64230	0,6279	0,56731	0,5445
Teste 2 C/rejeito		3.730,9	3.740,2	3.742,3	3.744,2	3.745,4	3.746,6	3.767,1	3.774,0	3.777,9	0,61354	g/dm^2.min^{0,5}	0,52165	g/dm^2.min^{0,5}

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.63 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (30 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,52

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (30 dias) - CP II V 40 - RS - a/c = 0,52														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	30 dias	3.628,7	3.631,0	3.632,8	3.634,4	3.635,0	3.635,6	3.636,8	3.637,8	3.638,5	0,44098	0,4793	0,103777	0,1100
Refer. 2 S/rejeito		3.539,2	3.541,9	3.543,1	3.545,7	3.546,5	3.547,3	3.548,6	3.549,9	3.550,3	0,51767	g/dm^2.min^{0,5}	0,11623	g/dm^2.min^{0,5}
Teste 1 C/rejeito		3.836,8	3.841,7	3.844,1	3.844,9	3.845,7	3.846,9	3.848,6	3.850,2	3.851,9	0,498498	0,5464	0,141137	0,1398
Teste 2 C/rejeito		3.844,7	3.848,6	3.850,1	3.852,6	3.853,9	3.854,8	3.855,9	3.856,8	3.858,6	0,594363	g/dm^2.min^{0,5}	0,138369	g/dm^2.min^{0,5}

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.64 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (90 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,52

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (90 dias) - CP IV 40 - RS - a/c = 0,52														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	90 dias	3.618,0	3.620,7	3.622,3	3.623,7	3.624,5	3.625,2	3.627,4	3.629,9	3.630,7	0,43139	0,4122	0,138369	0,1294
Refer. 2 S/rejeito		3.591,7	3.595,1	3.596,6	3.597,7	3.598,5	3.599,2	3.602,1	3.603,1	3.603,8	0,39305	g/dm^2.min^{0,5}	0,12038	g/dm^2.min^{0,5}
Teste 1 C/rejeito		3.835,0	3.839,9	3.841,6	3.843,7	3.844,5	3.845,1	3.846,3	3.847,7	3.849,2	0,49650	0,5177	0,12868	0,1363
Teste 2 C/rejeito		3.829,6	3.834,9	3.836,3	3.838,0	3.839,4	3.840,5	3.841,9	3.843,2	3.845,3	0,53684	g/dm^2.min^{0,5}	0,14390	g/dm^2.min^{0,5}

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.65 – Ensaio comparativo de absorção por capilaridade do concreto (180 dias) CP IV - 40 RS a/c=0,52

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (180 dias) - CP II 40 - RS - a/c = 0,52														
Tempo / CP's	Idade do CP	0 min.	10 min.	15 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{10})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{10min})/S.t^{0,5}$	
Refer. 1 S/rejeito	180 dias	3.570,4	3.573,3	3.574,6	3.575,7	3.576,5	3.577,1	3.579,4	3.580,9	3.581,8	0,36429	0,3595	0,11761	0,1162
Refer. 2 S/rejeito		3.640,0	3.643,1	3.644,3	3.645,3	3.646,3	3.646,8	3.648,8	3.650,7	3.651,4	0,35470	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,11485	$g/dm^2.min^{0,5}$
Teste 1 C/rejeito		3.829,8	3.835,1	3.836,9	3.838,4	3.839,5	3.840,4	3.842,1	3.843,9	3.845,1	0,50808	0,4889	0,13837	0,1411
Teste 2 C/rejeito		3.846,9	3.852,9	3.854,6	3.856,0	3.857,0	3.857,8	3.860,4	3.862,4	3.863,3	0,46974	$g/dm^2.min^{0,5}$	0,14390	$g/dm^2.min^{0,5}$

Fonte: O autor, 2015.

7.2.9. Ensaios comparativos adicionais de durabilidade acelerada

Não programado, inicialmente, para integrar a presente pesquisa, entendeu o autor da possibilidade de realizar uma verificação adicional, uma visão prévia do comportamento comparativo de alguns corpos de prova ainda disponíveis dos concretos produzidos quando submetidos a ciclos de imersão e secagem em solução de sulfato de magnésio ($MgSO_4$). Estimou-se que essas análises subsidiariam o rol de sugestões para estudos futuros, constantes do capítulo 10 desta tese.

Dois a dois foram separados corpos de prova remanescentes dos concretos produzidos com o cimento CP II – E 32, fator a/c = 0,63 **(o)**, com e sem rejeito, bem como outros quatro corpos de prova, dois a dois, remanescentes dos concretos produzidos com o cimento CP IV – 40 RS, fator a/c = 0,63 **(oo)**, com e sem rejeito.

Em recipientes adequados, conforme ilustrado na Figura 7.166, foram preparadas soluções do sal seguindo os parâmetros da norma ACI 201.2R-01 (2000), que estabelece ser muito severa (classe 3) a solução que apresente uma concentração do sulfato superior a 10.000ppm. Visando acelerar o processo e experimentar a obtenção de algum resultado em tempo mais reduzido, optou-se por uma concentração de 50.000ppm, o correspondente a 50gr do sal por litro de água. Foi utilizado o sulfato de magnésio industrial, comercializado pela empresa Sulfal Química Ltda., de Belo Horizonte, numa concentração de 98%.

Os corpos de prova foram submersos e cobertos por uma lâmina de solução sulfatada com espessura aproximada de 3 a 4cm, o necessário apenas para que fossem

facilmente removidos, manualmente, pelo técnico laboratorista, para secagem, com o emprego de um par de luvas nitrílicas.





Figura 7.166 – Imagem de uma das condições em que ocorriam os ciclos de submersão e secagem de amostras do concreto em solução do sulfato de magnésio
Fonte: O autor, 2015.

Durante os últimos 60 dias dos trabalhos de laboratório, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de imersão por 24 horas e secagem por 48 horas. Ao término dos 60 dias, foram levados a secar ao ambiente durante 10 dias e, posteriormente, submetidos ao ensaio de absorção por capilaridade, tal como no item 7.2.8 anterior.

Em paralelo, para comparação específica, um conjunto de quatro corpos de prova, um de cada concreto ensaiado, não submetidos aos ciclos de submersão na solução do sal, foi, igualmente, submetido ao mesmo ensaio de absorção por capilaridade.

As Tabelas 7.66 a 7.68 apresentam os valores dos ensaios de absorção por capilaridade obtidos nos concretos analisados, com um e outro tipo de agregado e cimentos utilizados.

Tabela 7.66 – Ensaio de absorção por capilaridade (adicional) >210 dias – CP II E-32 após sulfato

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (>210 dias) - CP II E - 32 a/c = 0,63 - APÓS SULFATO															
CP's \ Tempo	Idade do CP	Peso seco inicial	Ciclos 60 dias	Peso seco após secagem	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{t0})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{t0min})/S.t^{0,5}$	
Refer. (o) - s/rejeito	> 210 dias	3.495,0		3.503,8	3.512,6	3.515,7	3.516,9	3.518,5	3.536,5	3.543,9	3.545,1	0,5656	0,5704	0,4497	0,4407
Refer. (o) - s/rejeito		3.471,6		3.493,0	3.501,1	3.503,9	3.505,2	3.507,1	3.522,9	3.530,9	3.532,3	0,5752	g/dm².min^{0,5}	0,4317	g/dm².min^{0,5}
Teste (o) - c/rejeito		3.699,1		3.733,1	3.741,7	3.744,1	3.745,4	3.746,2	3.763,6	3.772,1	3.773,4	0,4314	0,4649	0,4386	0,4504
Teste (o) - c/rejeito		3.721,4		3.768,7	3.778,1	3.780,9	3.782,2	3.783,3	3.801,9	3.810,1	3.811,5	0,4985	g/dm².min^{0,5}	0,4622	g/dm².min^{0,5}

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.67 – Ensaio de absorção por capilaridade (adicional) >210 dias – CP IV 40 RS após sulfato

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (>210 dias) - CP IV 40 - RS a/c = 0,63 - APÓS SULFATO															
CP's \ Tempo	Idade do CP	Peso seco inicial	Ciclos 60 dias	Peso seco após secagem	10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{t0})/S.t^{0,5}$		Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{t0min})/S.t^{0,5}$	
Refer. (oo) - s/rejeito	> 210 dias	3.528,4		3.531,3	3.540,1	3.547,6	3.549,5	3.550,6	3.570,4	3.581,4	3.582,8	1,0066	1,0497	0,5808	0,5798
Refer. (oo) - s/rejeito		3.543,1		3.547,6	3.554,6	3.562,7	3.564,7	3.566,0	3.584,1	3.594,1	3.595,7	1,0929	g/dm².min^{0,5}	0,5887	g/dm².min^{0,5}
Teste (oo) - c/rejeito		3.677,8		3.726,1	3.739,4	3.744,5	3.745,7	3.748,1	3.770,7	3.780,0	3.781,5	0,8340	0,8149	0,5825	0,5694
Teste (oo) - c/rejeito		3.654,0		3.691,0	3.703,9	3.708,7	3.709,8	3.712,2	3.732,4	3.742,8	3.744,1	0,7957	g/dm².min^{0,5}	0,5562	g/dm².min^{0,5}

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 7.68 – Ensaio de absorção por capilaridade (adicional) >210 dias – CP IV 40 RS sem sulfato

ENSAIO COMPARATIVO DE ABSORÇAO POR CAPILARIDADE DO CONCRETO (>210 dias) - CP II E - 32 e CP IV - 40 RS - a/c = 0,63 - SEM SULFATO													
CP's \ Tempo	Idade do CP	Peso seco		10 min.	30 min.	60 min.	90 min.	24 hs.	48 hs.	72 hs.	Coef. Capilaridade aos 90 min. $C=(m_{90}-m_{t0})/S.t^{0,5}$	Coef. Capilaridade às 72 hs. $C=(m_{72h}-m_{t0min})/S.t^{0,5}$
CP II-E 32 (o) - s/rejeito	> 210 dias	3.595,9		3.598,9	3.600,9	3.601,8	3.602,9	3.615,5	3.622,0	3.623,5	0,3835	0,3404
CP II-E 32 (o) - c/rejeito		3.618,4		3.626,4	3.628,8	3.631,5	3.633,1	3.648,1	3.657,3	3.660,9	0,6423	0,4774
CP IV-40 RS (oo) - s/rejeito		3.561,6		3.565,9	3.567,0	3.567,3	3.567,8	3.572,7	3.576,2	3.578,3	0,1821	0,1716
CP IV-40 RS (oo) - c/rejeito		3.661,5		3.674,6	3.678,5	3.680,2	3.681,3	3.704,9	3.716,2	3.721,4	0,6423	0,6476

Fonte: O autor, 2015.

Os corpos de prova do concreto sem rejeito, produzidos com o cimento CP II – E 32, a/c=0,63, apresentaram aumento médio aproximado de seus pesos em 0,5% entre a

pesagem inicial e o peso após a secagem, depois de concluídos os ciclos de imersão. Os do concreto com rejeito, do mesmo cimento e fator a/c, registraram aumento médio de seus pesos de 1% (aproximadamente).

Os corpos de prova do concreto sem rejeito, produzidos com o cimento CP IV – 40 RS, a/c=0,63, apresentaram aumento médio aproximado de seus pesos em 0,10% entre a pesagem inicial e o peso após a secagem, depois de concluídos os ciclos de imersão. Os do concreto com rejeito, do mesmo cimento e fator a/c, registraram aumento médio de seus pesos de 1,15% (aproximadamente).

No período dos ensaios nenhuma alteração externa foi observada nos corpos de prova, inclusive na solução de imersão, que se manteve limpa e cristalina durante todo o tempo. Observe-se que neste ensaio de absorção por capilaridade, dentre os oito valores de medição registrados, os corpos de prova submetidos aos ciclos de imersão na solução de sulfato de magnésio, cinco apresentaram valores de absorção superiores aos seus respectivos comparativos.

8. ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO

Nos itens 7.1.3 e 7.2.1 foram apresentadas sequências de imagens obtidas em análises de microscopia de varredura de elétrons, algumas com os respectivos espectrogramas da microanálise procedida, de forma a propiciar a avaliação das características integrantes das ITZ observadas na argamassa e nos concretos produzidos com e sem o rejeito em estudo.

Por conveniência metodológica, em se tratando de análise de imagens, os comentários pertinentes foram desenvolvidos e apresentados nos respectivos itens.

A partir do item 7.2.2 foram apresentados os ensaios físicos desenvolvidos com o registro dos resultados numéricos obtidos nas respectivas tabelas, cuja variedade de parâmetros e quantidade de valores dificulta, por si só, análises diretas e consistentes das performances/desempenhos observados nos diversos procedimentos. O emprego da representação gráfica, especialmente no tocante aos resultados numéricos, propicia uma visão ilustrada do comportamento físico dos materiais pesquisados, com suas variações ao longo dos tempos de avaliação. Apresenta significativa visibilidade para análise e discussão mais específica dos resultados obtidos, ensejando avaliações adequadas e comentários pertinentes.

Na mesma ordem em que foram apresentadas as tabelas numéricas dos ensaios comparativos realizados, seguem-se informações compiladas com os valores médios dos resultados obtidos em cada concreto ensaiado em suas respectivas idades de avaliação, juntamente com sua respectiva representação gráfica, acompanhadas de comentários e avaliações.

8.1. Análises compiladas

8.1.1. Resistência à compressão simples

A Figura 8.167 apresenta os valores e curvas (comparativos) de resistência à compressão de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP II E – 32 e a/c 0,63.

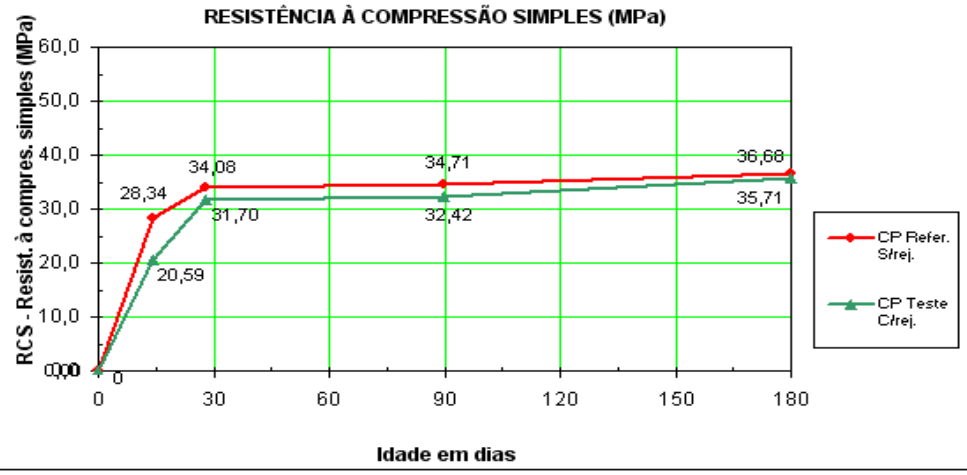
COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL		CP Refer.	CP Teste	
	IDENTIFICAÇÃO		Refer. sem rej.	Teste com rej.	
	NATUREZA		Pesquisa	Pesquisa	
	ORIGEM		DEMC	DEMC	
	PROPRIETÁRIO		Ayrton	Ayrton	
	PESO MÉDIO				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		Ø100 X 200	Ø100 X 200	
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)				
	CIMENTO - TRAÇO		CP II E 32 - a/c = 0,63		
	UTILIZAÇÃO		Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES **(MPa)**

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DOS CORPOS DE PROVA POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		CP Teste C/rej.			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idades em dias	0								
				0		0			
	14								
				28,34		20,59			
	28								
				34,08		31,70			
	90								
				34,71		32,42			
	180								
				36,68		35,71			

CURVAS DE RESISTÊNCIA POR TRAÇO PROCESSADO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.167 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E – 32, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.167 que, nos concretos com o emprego do cimento CP II – E 32, com fator a/c = 0,63, as curvas de evolução de suas resistências à compressão simples nas idades analisadas mantiveram-se quase que paralelas, sendo que o concreto contendo o rejeito manteve-se com resistências sempre inferiores ao concreto sem rejeito, considerado como referência. Foi registrado um distanciamento inicial, aos 14 dias, numa ordem de grandeza aproximada de 27,5%, tendo-se reduzido aos 28 dias para próximo aos 7%, mantendo cerca de 7% aos 90 dias e alcançando, aos 180 dias, uma redução aproximada de 2,5%.

A Figura 8.168 apresenta os valores e curvas (comparativos) de resistência à compressão de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP IV 40 – RS e a/c 0,63.

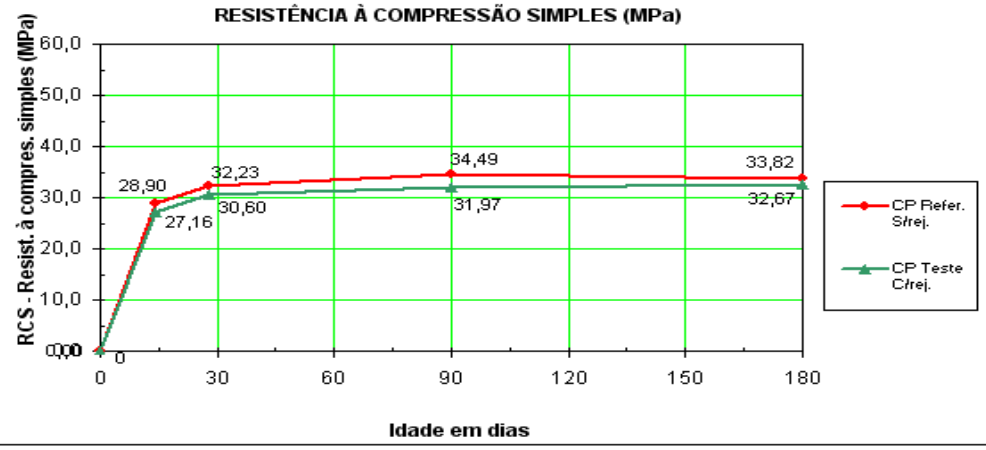
COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL		CP Refer.	CP Teste	
	IDENTIFICAÇÃO		Refer. sem rej.	Teste com rej.	
	NATUREZA		Pesquisa	Pesquisa	
	ORIGEM		DEMC	DEMC	
	PROPRIETÁRIO		Ayrton	Ayrton	
	PESO MÉDIO				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		Ø100 X 200	Ø100 X 200	
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)				
	CIMENTO - TRAÇO		CP IV 40 RS - a/c = 0,63		
	UTILIZAÇÃO		Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES **(MPa)**

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DOS CORPOS DE PROVA POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		CP Teste C/rej.			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idades em dias	0								
				0		0			
	14								
				28,90		27,16			
	28								
				32,23		30,60			
	90								
				34,49		31,97			
	180								
				33,82		32,67			

CURVAS DE RESISTÊNCIA POR TRAÇO PROCESSADO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.168 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.168 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV 40 – RS, com fator a/c = 0,63, as curvas de evolução de suas resistências à compressão simples nas idades analisadas mantiveram-se também muito próximas, prevalecendo que o concreto contendo o rejeito manteve-se também com resistências sempre inferiores ao concreto sem rejeito, considerado como referência. Foi registrado um distanciamento maior apenas aos 90 dias, numa ordem de grandeza de, aproximadamente, de 7,5 %, tendo-se mantido nas demais idades de 14, 28 e 180 dias as diferenças respectivas de 6%, 5% e 3,5%.

A Figura 8.169 apresenta os valores e curvas (comparativos) de resistência à compressão de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP IV 40 – RS e a/c 0,52.

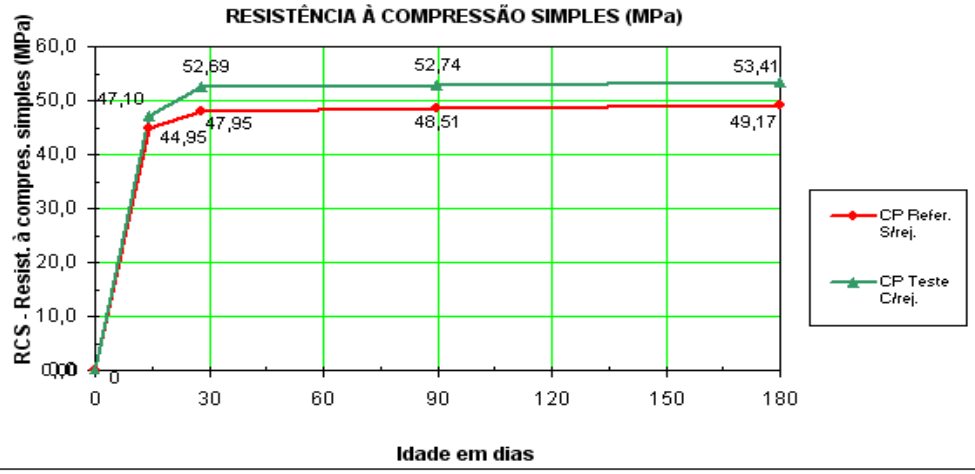
COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL		CP Refer.	CP Teste	
	IDENTIFICAÇÃO		Refer. sem rej.	Teste com rej.	
	NATUREZA		Pesquisa	Pesquisa	
	ORIGEM		DEMC	DEMC	
	PROPRIETÁRIO		Ayrton	Ayrton	
	PESO MÉDIO				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		Ø100 X 200	Ø100 X 200	
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)				
	CIMENTO - TRAÇO		CP IV 40 RS - a/c = 0,52		
	UTILIZAÇÃO		Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES **(MPa)**

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DOS CORPOS DE PROVA POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		CP Teste C/rej.			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idades em dias	0								
				0		0			
	14								
				44,95		47,10			
	28								
				47,95		52,69			
	90								
				48,51		52,74			
	180								
				49,17		53,41			

CURVAS DE RESISTÊNCIA POR TRAÇO PROCESSADO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.169 – Valores e curvas comparativos de resistência à compressão simples de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.169 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV 40 – RS, com fator a/c = 0,52, as curvas de evolução de suas resistências à compressão simples nas idades analisadas apresentaram uma total inversão em relação às condições verificadas, anteriormente. Aqui o concreto contendo o rejeito manteve-se com resistências sempre superiores ao concreto sem rejeito, considerado como referência. Aos 14 dias a diferença foi de, aproximadamente, 5,0%, elevando-se nas demais idades de 28, 90 e 180 dias para os valores da ordem de, respectivamente, 10%, 9% e 9%.

8.1.2. Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 8.170 apresenta os valores e curvas (comparativos) de resistência à tração por compressão diametral de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP II E-32 e a/c 0,63.

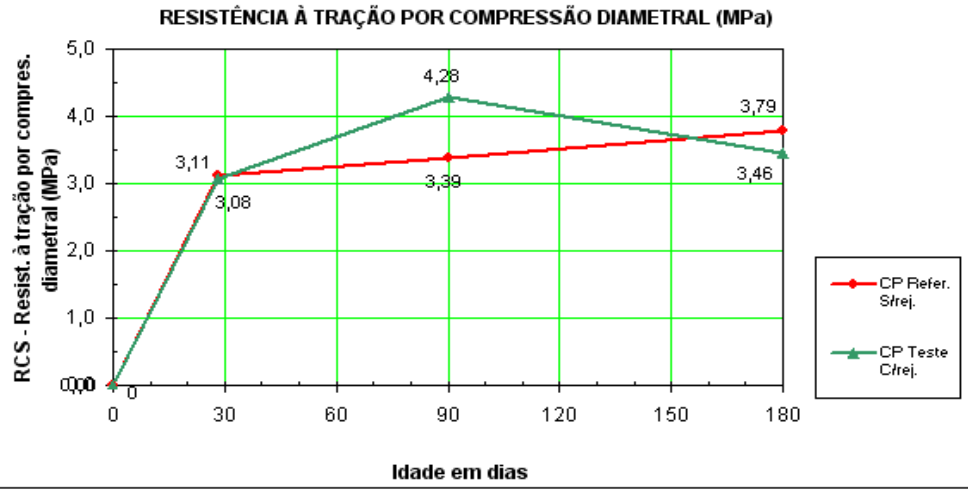
COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

INFORMAÇÕES GERAIS			
MATERIAL	**CP Refer.**	**CP Teste**	
IDENTIFICAÇÃO	**Refer. sem rej.**	**Teste com rej.**	
NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa	
ORIGEM	DEMC	DEMC	
PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton	
PESO MÉDIO			
DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200	Ø100 X 200	
DIMENSÃO MÉDIA (mm)			
CIMENTO - TRAÇO	**CP II E 32 - a/c = 0,63**		
UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DOS CORPOS DE PROVA POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		**CP Teste C/rej.**			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idade em dias	**0**								
				0		**0**			
	28								
				3,11		**3,08**			
	90								
				3,39		**4,28**			
	180								
				3,79		**3,46**			

CURVAS DE RESISTÊNCIA POR TRAÇO PROCESSADO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.170 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.170 que, nos concretos com o emprego do cimento CP II – E 32, com fator a/c = 0,63, as curvas de evolução de suas resistências à tração por compressão diametral até a idade de 28 dias evoluíram praticamente juntas, alcançando esta idade com uma diferença insignificante, da ordem de 1%, sendo menor no concreto contendo o rejeito. A partir daí, nas idades de 90 e 180 dias, o que se observou foi uma inversão de comportamento entre os concretos: o traço com o rejeito apresentou-se aproximadamente 26% a maior que o traço sem rejeito aos 90 dias e 9,5 % a menor aos 180 dias.

A Figura 8.171 apresenta os valores e curvas (comparativos) de resistência à tração por compressão diametral de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP IV 40 RS e a/c 0,63.

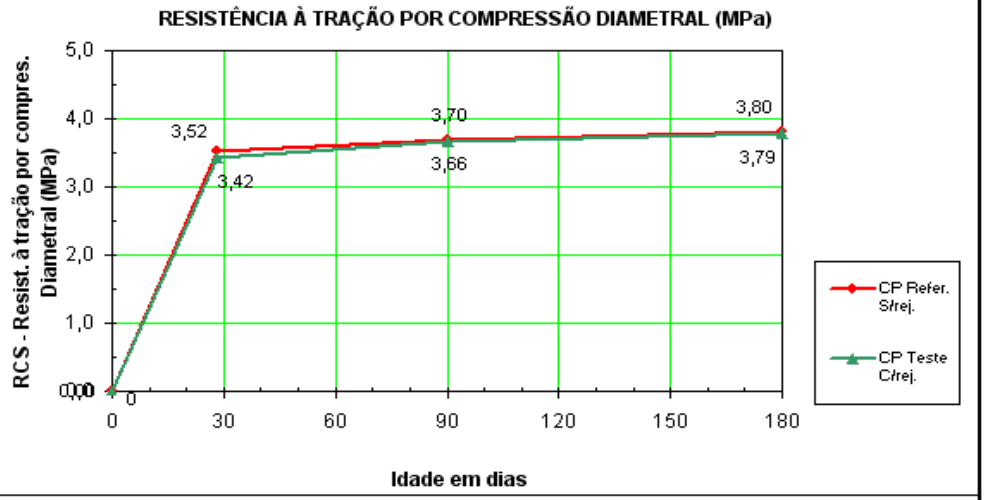
COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

INFORMAÇÕES GERAIS			
MATERIAL		**CP Refer.**	**CP Teste**
IDENTIFICAÇÃO		**Refer. sem rej.**	**Teste com rej.**
NATUREZA		Pesquisa	Pesquisa
ORIGEM		DEMC	DEMC
PROPRIETÁRIO		Ayrton	Ayrton
PESO MÉDIO			
DIMENSÃO NOMINAL (mm)		Ø100 X 200	Ø100 X 200
DIMENSÃO MÉDIA (mm)			
CIMENTO - TRAÇO		**CP IV 40 RS - a/c = 0,63**	
UTILIZAÇÃO		Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DOS CORPOS DE PROVA POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		**CP Teste C/rej.**			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idade em dias	**0**								
				0		**0**			
	28								
				3,52		**3,42**			
	90								
				3,70		**3,66**			
	180								
				3,80		**3,79**			

CURVAS DE RESISTÊNCIA POR TRAÇO PROCESSADO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.171 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.171 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV 40 – RS, com fator a/c = 0,63, as curvas de evolução de suas resistências à tração por compressão diametral nas idades analisadas mantiveram-se, praticamente, juntas, podendo-se observar que o concreto contendo o rejeito, ainda assim, apresentou resistências sempre inferiores ao concreto sem rejeito, considerado como referência. As diferenças nas idades de 28, 90 e 180 dias foram, respectiva e aproximadamente, de 3%, 1% e 0,5%.

A Figura 8.172 apresenta os valores e curvas (comparativos) de resistência à tração por compressão diametral de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP IV 40 RS e a/c 0,52.

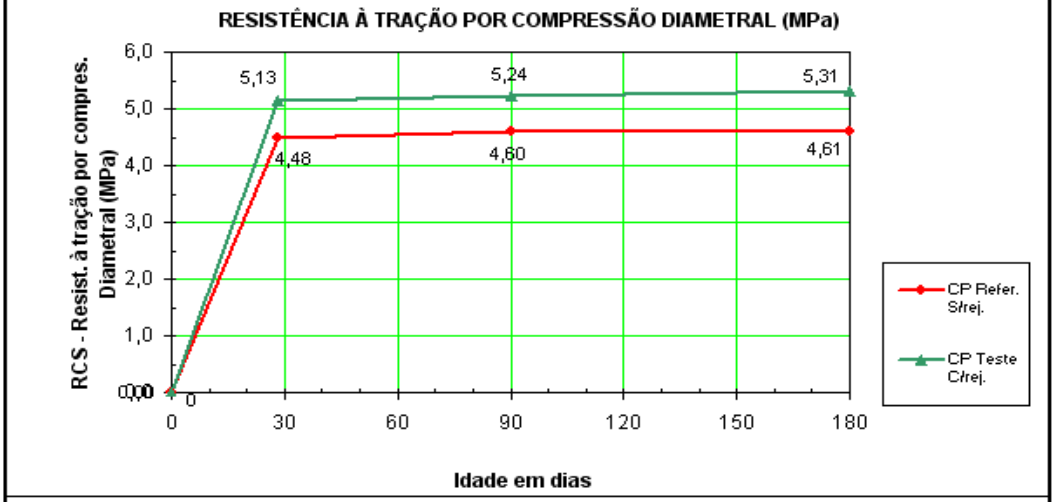
COMPARATIVO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

INFORMAÇÕES GERAIS			
MATERIAL	**CP Refer.**	**CP Teste**	
IDENTIFICAÇÃO	**Refer. sem rej.**	**Teste com rej.**	
NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa	
ORIGEM	DEMC	DEMC	
PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton	
PESO MÉDIO			
DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200	Ø100 X 200	
DIMENSÃO MÉDIA (mm)			
CIMENTO - TRAÇO	**CP IV 40 RS - a/c = 0,52**		
UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DOS CORPOS DE PROVA POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		**CP Teste C/rej.**			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idade em dias	0								
				0		**0**			
	28								
				4,48		**5,13**			
	90								
				4,60		**5,24**			
	180								
				4,61		**5,31**			

CURVAS DE RESISTÊNCIA POR TRAÇO PROCESSADO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.172 – Valores e curvas comparativos de resistência à tração por compressão diametral de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.172 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,52, as curvas de evolução de suas resistências à tração por compressão diametral retrataram um comportamento nas idades analisadas bem diferente que as dos traços anteriores deste item. Aqui o traço do concreto, contendo o rejeito, esteve sempre com valores superiores ao traço sem rejeito. Suas curvas se mantiveram quase paralelas, com diferenças de 14,5%, 14% e 15% nas idades analisadas: 28, 90 e180 dias, respectivamente.

8.1.3. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 8.173 apresenta os valores e curvas (comparativos) do módulo de elasticidade dinâmico de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP II-E 32 e a/c 0,63.

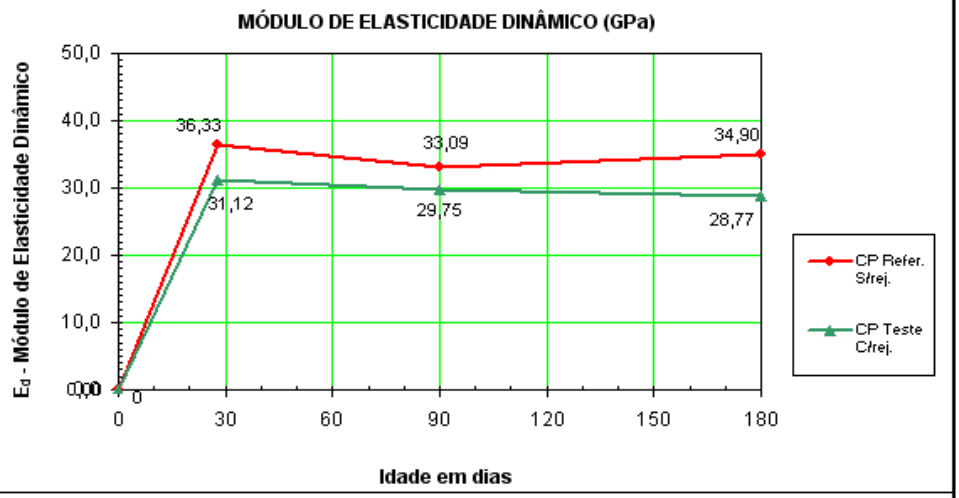
COMPARATIVO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)

INFORMAÇÕES GERAIS			
MATERIAL		CP Refer.	CP Teste
IDENTIFICAÇÃO		Refer. sem rej.	Teste com rej.
NATUREZA		Pesquisa	Pesquisa
ORIGEM		DEMC	DEMC
PROPRIETÁRIO		Ayrton	Ayrton
PESO MÉDIO			
DIMENSÃO NOMINAL (mm)		Ø100 X 200	Ø100 X 200
DIMENSÃO MÉDIA (mm)			
CIMENTO - TRAÇO		CP II E 32 - a/c = 0,63	
UTILIZAÇÃO		Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DAS AMOSTRAS POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		CP Teste C/rej.			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idade em dias	0								
				0		0			
	28								
				36,33		31,12			
	90								
				33,09		29,75			
	180								
				34,90		28,77			

CURVAS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.173 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II-E 32, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.173 que, nos concretos com o emprego do cimento CP II – E 32, com fator a/c = 0,63, as curvas de evolução da avaliação do seu módulo de elasticidade dinâmico nas idades analisadas apresentaram razoável regularidade, mantendo-se a do concreto contendo o rejeito sempre inferior à do concreto sem rejeito, considerado como referência. Foi registrado um distanciamento inicial, aos 28 dias, numa ordem de grandeza de aproximadamente 14,5%, tendo-se reduzido aos 90 dias para próximo aos 10% e apresentado um pequeno acréscimo aos 180 dias, para aproximadamente 17,5%.

A Figura 8.174 apresenta os valores e curvas (comparativos) do módulo de elasticidade dinâmico de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP IV 40 RS e a/c 0,63.

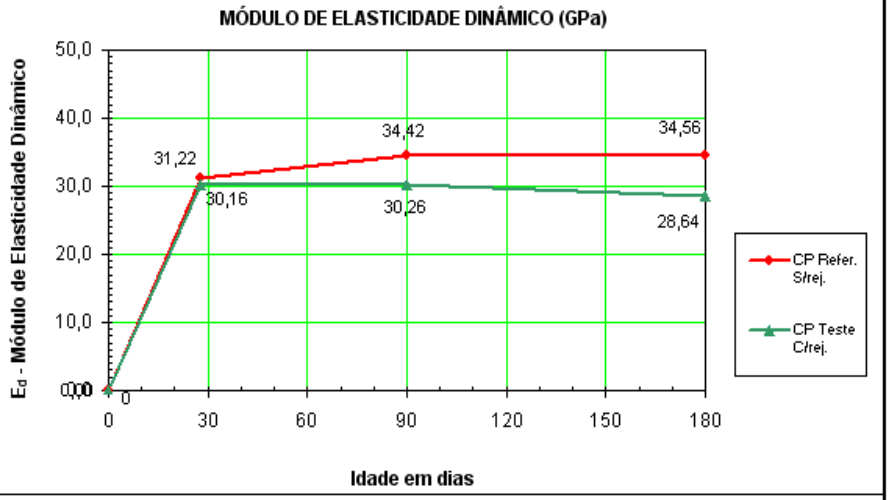
COMPARATIVO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)

INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL		CP Refer.	CP Teste	
	IDENTIFICAÇÃO		Refer. sem rej.	Teste com rej.	
	NATUREZA		Pesquisa	Pesquisa	
	ORIGEM		DEMC	DEMC	
	PROPRIETÁRIO		Ayrton	Ayrton	
	PESO MÉDIO				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		Ø100 X 200	Ø100 X 200	
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)				
	CIMENTO - TRAÇO		CP IV 40 RS - a/c = 0,63		
	UTILIZAÇÃO		Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DAS AMOSTRAS POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		CP Teste C/rej.			
		1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.	1°. Result.	2°. Result.
Idade em dias	0								
				0		0			
	28								
				31,22		30,16			
	90								
				34,42		30,26			
	180								
				34,56		28,64			

CURVAS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.174 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.174 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV 40 – RS, com fator a/c = 0,63, as curvas de evolução da avaliação dos seus módulos de elasticidade dinâmico, nas idades analisadas, retrataram que o concreto contendo o rejeito manteve-se também com valores sempre inferiores ao concreto sem rejeito, considerado como referência, porém com diferenças que cresceram ao longo das idades avaliadas. Aos 28 dias a diferença foi da ordem de 3,5%, subindo para 12% aos 90 dias e alcançando 17% aos 180 dias.

A Figura 8.175 apresenta os valores e curvas (comparativos) do módulo de elasticidade dinâmico de concretos (referência: sem rejeito e teste: com rejeito) com CP IV 40 RS e a/c 0,52.

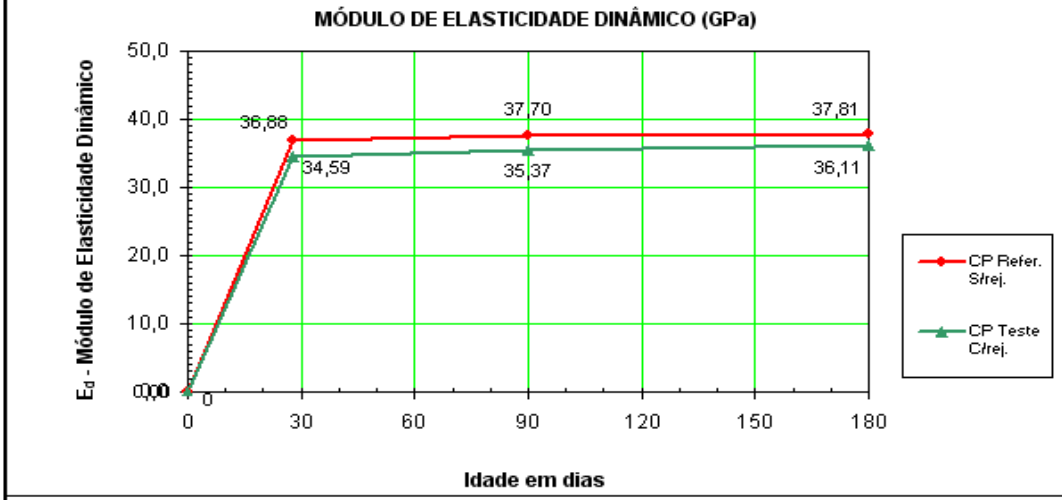
COMPARATIVO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)

INFORMAÇÕES GERAIS			
MATERIAL	**CP Refer.**	**CP Teste**	
IDENTIFICAÇÃO	**Refer. sem rej.**	**Teste com rej.**	
NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa	
ORIGEM	DEMC	DEMC	
PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton	
PESO MÉDIO			
DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200	Ø100 X 200	
DIMENSÃO MÉDIA (mm)			
CIMENTO - TRAÇO	**CP IV 40 RS - a/c = 0,52**		
UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (GPa)

Identificação dos Traços		RESULTADOS MÉDIOS DAS AMOSTRAS POR TRAÇO							
				CP Refer. S/rej.		**CP Teste C/rej.**			
		1'. Result.	2'. Result.	1'. Result.	2'. Result.	1'. Result.	2'. Result.	1'. Result.	2'. Result.
Idade em dias	**0**								
				0		**0**			
	28								
				36,88		**34,59**			
	90								
				37,70		**35,37**			
	180								
				37,81		**36,11**			

CURVAS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.175 – Valores e curvas comparativos do módulo de elasticidade dinâmico de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 8.175 pode-se observar que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,52, as curvas de evolução da avaliação do módulo de elasticidade dinâmico dos concretos nas idades ensaiadas retrataram um comportamento semelhante ao das figuras anteriores no que tange aos valores sempre inferiores do concreto contendo o rejeito em relação ao concreto sem rejeito, considerado como de referência. As diferenças nas idades dos ensaios foram, respectivamente, da ordem de 6%, 6% e 4,5%.

8.1.4. Resistência à abrasão seca

Para a apresentação comparativa dos desgastes por abrasão a seco, optou-se pela representação gráfica no modo colunas, pois se trata de ensaio desenvolvido em dois estágios (250 e 500 voltas do disco abrasivo), propiciando, assim, a marcação e visualização mais clara no corpo das colunas do estágio inicial dos ensaios.

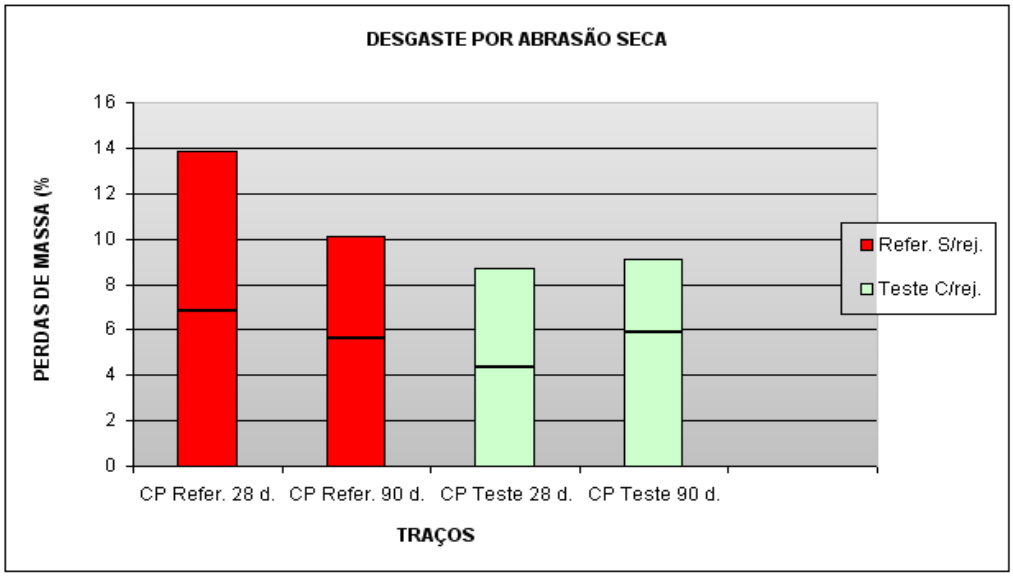
A Figura 8.176 mostra valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63.

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO SECA

INFORMAÇÕES GERAIS			
PEÇA	CP Refer.	CP Teste	
MATERIAL	Refer. sem rej.	Teste com rej.	
ORIGEM	DEMC	DEMC	
FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa	
INTERESSADO	Ayrton	Ayrton	
PESO MÉDIO (Kg)			
DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200 mm	Ø100 X 200 mm	
DIMENSÃO MÉDIA (mm)			
CIMENTO - TRAÇO	CP II E 32 - a/c = 0,63		
UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO SECA

Identificação dos Traços		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)	
		250 voltas = 500m	500 voltas = 1000 m
		DESGASTE MÉDIO DAS AMOSTRAS POR TRAÇO	
TRAÇOS Idade	CP Refer. S/rej. 28 dias	6,80	13,88
	CP Refer. S/rej. 90 dias	5,64	10,13
	CP Teste C/rej. 28 dias	4,33	8,72
	CP Teste C/rej. 90 dias	5,89	9,13



OBSERVAÇÕES:

Desgaste expresso em % de perda de massa

Figura 8.176 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 8.176 observa-se que, nos concretos com o emprego do cimento CP II – E 32, com fator a/c = 0,63, as colunas representativas dos índices de desgaste à abrasão seca, nas idades dos ensaios, mostram o concreto com rejeito com um desempenho melhor que o do concreto sem o rejeito. O desempenho parcial dos corpos de prova nos ensaios, 250 voltas, pode ser conhecido pelos traços horizontais que cortam as respectivas colunas. Ao término dos ensaios, 500 voltas, o concreto com rejeito, tomado como teste, apresentou aos 28 dias um desgaste 37% menor que o concreto sem rejeito, tomado como referência. Aos 90 dias esta diferença reduziu-se bastante, para 9%, ainda assim tendo o concreto com rejeito desempenho superior ao do concreto sem rejeito.

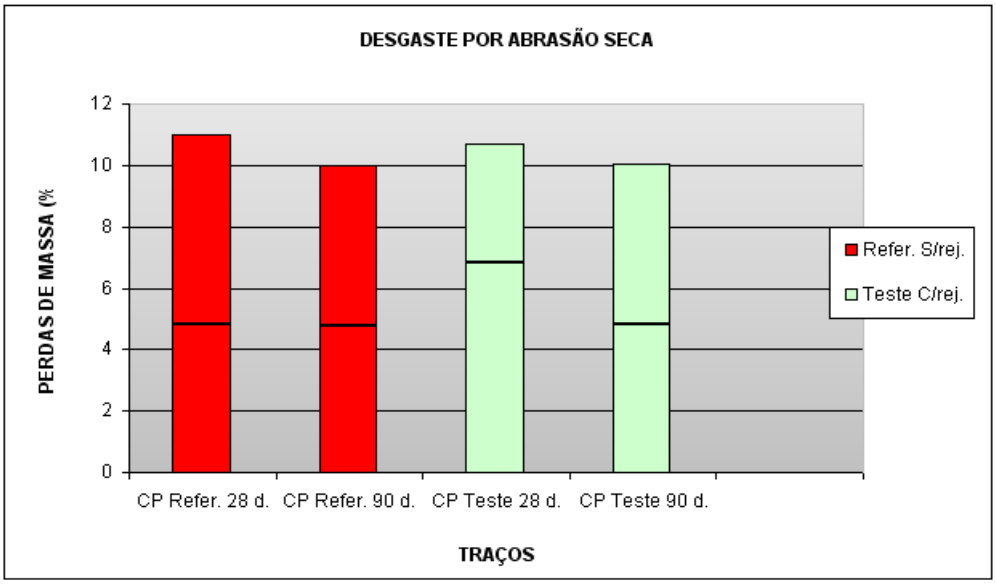
A Figura 8.177 mostra valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63.

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO SECA

INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	CP Refer.	CP Teste
	MATERIAL	Refer. sem rej.	Teste com rej.
	ORIGEM	DEMC	DEMC
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO (Kg)		
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200 mm	Ø100 X 200 mm
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		
	CIMENTO - TRAÇO	CP IV 40 RS - a/c = 0,63	
	UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO SECA

Identificação dos Traços		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)	
		250 voltas = 500m	500 voltas = 1000 m
		DESGASTE MÉDIO DAS AMOSTRAS POR TRAÇO	
TRAÇOS Idade	CP Refer. S/rej. 28 dias	4,82	11,01
	CP Refer. S/rej. 90 dias	4,76	9,98
	CP Teste C/rej. 28 dias	6,85	10,71
	CP Teste C/rej. 90 dias	4,82	10,05



OBSERVAÇÕES:

Desgaste expresso em % de perda de massa

Figura 8.177 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.177 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,63, as colunas que representam os índices de desgaste à abrasão seca nas idades dos ensaios, ao fim das 500 voltas, apresentam-se, praticamente iguais, mas com uma pequena inversão. O concreto com rejeito, tomado como teste, apresentou aos 28 dias um desgaste 3% menor que o concreto sem rejeito, tomado como referência. Aos 90 dias observou-se a inversão, tendo o concreto com rejeito apresentado um desgaste cerca de 1% maior que o do concreto sem rejeito.

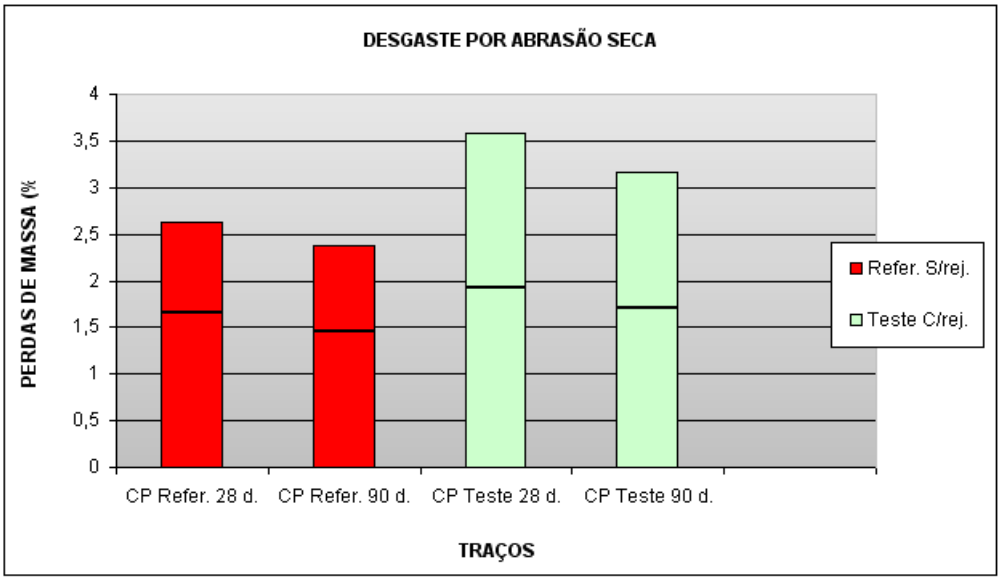
A Figura 8.178 mostra valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52.

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO SECA

INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	CP Refer.	CP Teste
	MATERIAL	Refer. sem rej.	Teste com rej.
	ORIGEM	DEMC	DEMC
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO (Kg)		
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200 mm	Ø100 X 200 mm
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		
	CIMENTO - TRAÇO	CP IV 40 RS - a/c = 0,52	
	UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO SECA

Identificação dos Traços		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)	
		250 voltas = 500m	500 voltas = 1000 m
		DESGASTE MÉDIO DAS AMOSTRAS POR TRAÇO	
TRAÇOS Idade	CP Refer. S/rej. 28 dias	1,66	2,63
	CP Refer. S/rej. 90 dias	1,46	2,37
	CP Teste C/rej. 28 dias	1,92	3,58
	CP Teste C/rej. 90 dias	1,71	3,17



OBSERVAÇÕES:

Desgaste expresso em % de perda de massa

Figura 8.178 – Valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão a seco de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.178 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,52, as colunas que representam os índices de desgaste à abrasão seca nas idades dos ensaios, ao fim das 500 voltas, apresentam-se, completamente diferentes das anteriores. Aqui foi significativo o desempenho melhor do concreto sem rejeito, tomado como referência, em relação ao concreto com rejeito, tomado como teste. Ao final das 500 voltas, aos 28 dias, o desgaste apresentado pelo concreto com rejeito foi 36% maior que o do concreto sem rejeito. Aos 90 dias este desgaste reduziu-se um pouco, mantendo-se ainda em 33% maior que o desgaste do concreto sem rejeito.

8.1.5. Resistência à abrasão hídrica

Para as comparações dos desgastes por abrasão hídrica, optou-se também pela representação gráfica no modo colunas. Embora o método de ensaio estabeleça ciclos, que foram efetivamente seguidos e constam das respectivas tabelas dos ensaios, nestas figuras comparativas foram mantidos os mesmos padrões de apresentação do item anterior, apresentando os valores ao final do ciclo médio (3º) e do último ciclo (6º), propiciando a marcação e visualização mais clara e objetiva no corpo das colunas desse estágio intermediário dos ensaios.

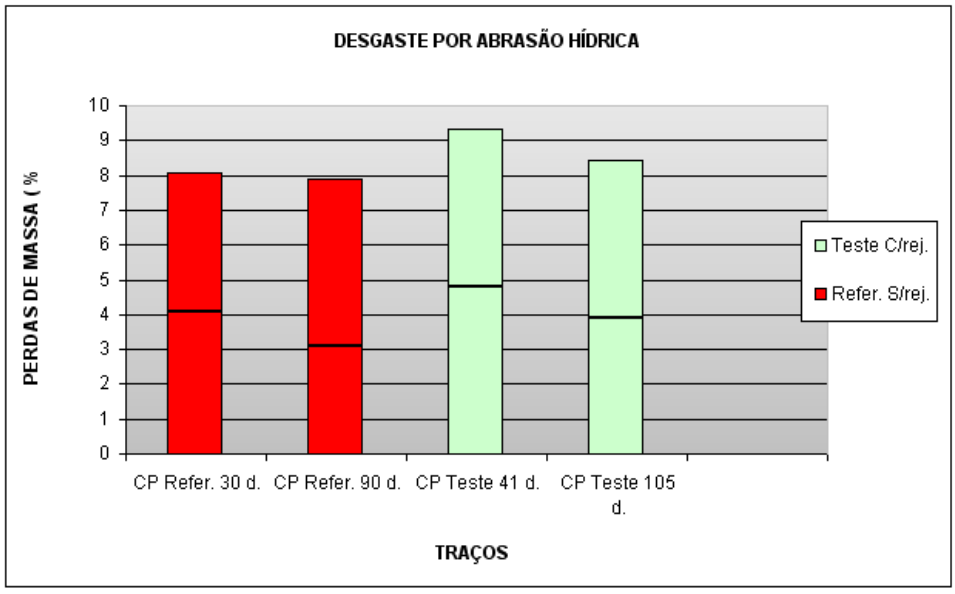
A Figura 8.179 mostra valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63.

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO HÍDRICA

INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	CP Refer.	CP Teste
	MATERIAL	Refer. sem rej.	Teste com rej.
	ORIGEM	DEMC	DEMC
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO (Kg)		
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200 mm	Ø100 X 200 mm
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		
	CIMENTO - TRAÇO	CP II E 32 - a/c = 0,63	
	UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO HÍDRICA

Identificação dos Traços		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)	
		Final do 3º Ciclo	Final do 6º Ciclo
		Desgaste das Amostras por traço (% em g)	
TRAÇOS Idade	CP Refer. S/rej. 30 dias	4,10	8,07
	CP Refer. S/rej. 90 dias	3,11	7,89
	CP Teste C/rej. 41 dias	4,79	9,31
	CP Teste C/rej. 105 dias	3,90	8,45



OBSERVAÇÕES:

Desgaste expresso em percentual do peso (g)

Figura 8.179 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 8.179 observa-se que nos concretos com o emprego do cimento CP II – E 32, com fator a/c = 0,63, as colunas representativas dos índices de desgaste à abrasão hídrica, nas idades dos ensaios, mostram o concreto com o rejeito tendo um desempenho sempre inferior ao do concreto sem o rejeito, ou seja, apresentando maior desgaste. O desempenho parcial dos corpos de prova nos ensaios, valor acumulado no 3º ciclo, pode ser conhecido pelos traços horizontais que cortam as respectivas colunas. Ao término dos ensaios, final do 6º ciclo, o concreto com rejeito, tomado como teste, apresentou aos 41 dias um desgaste 15% maior que o concreto sem rejeito aos 30 dias, tomado como referência. Aos 105 dias esta diferença reduziu-se, significativamente, para 7%, ainda assim tendo o concreto com rejeito desempenho inferior ao do concreto sem rejeito, aos 90 dias.

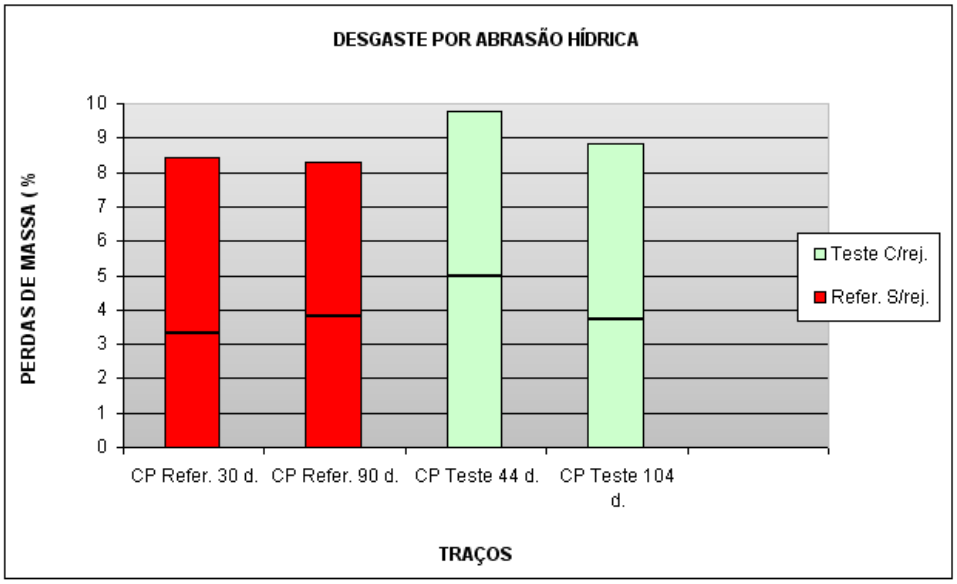
A Figura 8.180 mostra valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63.

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO HÍDRICA

INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA	CP Refer.	CP Teste
	MATERIAL	Refer. sem rej.	Teste. com rej.
	ORIGEM	DEMC	DEMC
	FINALIDADE	Pesquisa	Pesquisa
	INTERESSADO	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO (Kg)		
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200 mm	Ø100 X 200 mm
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		
	CIMENTO - TRAÇO	CP IV 40 RS - a/c = 0,63	
	UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO HÍDRICA

Identificação dos Traços		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)	
		Final do 3º Ciclo	Final do 6º Ciclo
		Desgaste das Amostras por traço (% em g)	
TRAÇOS Idade	CP Refer. S/rej. 30 dias	3,32	8,45
	CP Refer. S/rej. 90 dias	3,79	8,30
	CP Teste C/rej. 44 dias	4,98	9,77
	CP Teste C/rej. 104 dias	3,70	8,83



OBSERVAÇÕES:

Desgaste expresso em percentual do peso (g)

Figura 8.180 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II 40 RS, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 8.180 observa-se que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,63, as colunas representativas dos índices de desgaste à abrasão hídrica, nas idades dos ensaios, mostram o concreto com o rejeito tendo um desempenho sempre inferior ao do concreto sem o rejeito, ou seja, apresentando maior desgaste. O desempenho parcial dos corpos de prova nos ensaios, valor acumulado no 3º ciclo, pode ser conhecido pelos traços horizontais que cortam as respectivas colunas. Ao término dos ensaios, final do 6º ciclo, o concreto com rejeito, tomado como teste, apresentou aos 44 dias um desgaste de aproximadamente 15% maior que o concreto sem rejeito, aos 30 dias, tomado como referência. Aos 104 dias esta diferença reduziu-se, significativamente, para 6%, ainda assim tendo o concreto com rejeito desempenho inferior ao do concreto sem rejeito, aos 90 dias.

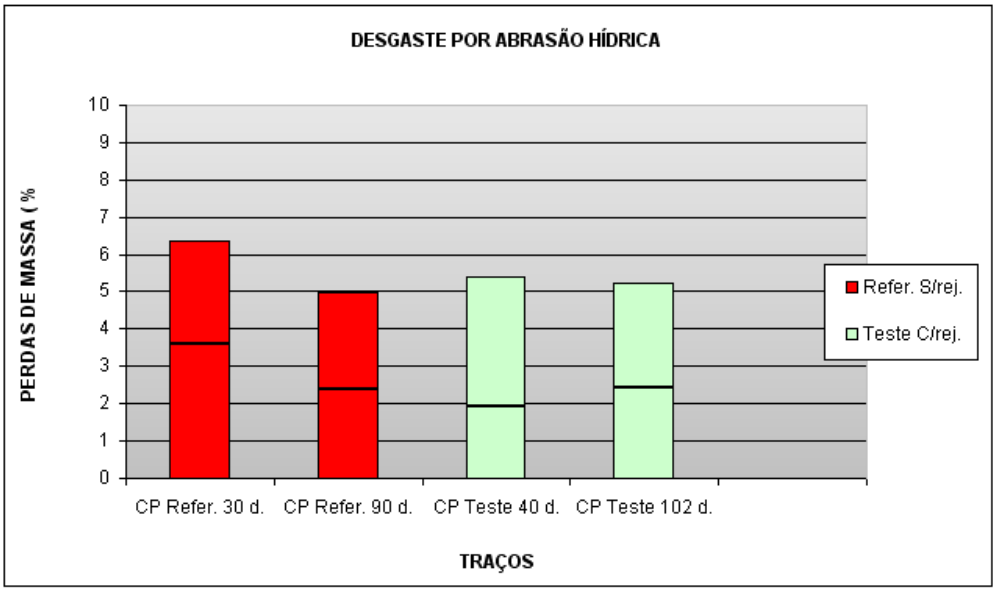
A Figura 8.181 mostra valores e colunas comparativos do desgaste por abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52.

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO HÍDRICA

INFORMAÇÕES GERAIS	PEÇA		CP Refer.	CP Teste	
	MATERIAL		Refer. sem rej.	Teste com rej.	
	ORIGEM		DEMC	DEMC	
	FINALIDADE		Pesquisa	Pesquisa	
	INTERESSADO		Ayrton	Ayrton	
	PESO MÉDIO (Kg)				
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)		Ø100 X 200 mm	Ø100 X 200 mm	
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)				
	CIMENTO - TRAÇO		CP IV 40 RS - a/c = 0,52		
	UTILIZAÇÃO		Concreto usual plástico	Concreto usual plástico	

COMPARATIVO DE DESGASTE POR ABRASÃO HÍDRICA

Identificação dos Traços		RESULTADOS DAS PERDAS DE MASSA (%)		
		Final do 3º Ciclo	Final do 6º Ciclo	
		Desgaste das Amostras por traço (% em g)		
TRAÇOS Idade	CP Refer. S/rej. 30 dias	3,59	6,38	
	CP Refer. S/rej. 90 dias	2,40	4,98	
	CP Teste C/rej. 40 dias	1,91	5,40	
	CP Teste C/rej. 102 dias	2,42	5,21	



OBSERVAÇÕES:

Desgaste expressas em percentual do peso (g)

Figura 8.181 – Valores e colunas comparativos de resistência à abrasão hídrica de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52
Fonte: O autor, 2015.

Na Figura 8.181 pode-se observar um comportamento ligeiramente diferente do observado nas figuras anteriores. Nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,52, as colunas representativas dos índices de desgaste à abrasão hídrica, nas idades dos ensaios, mostram o concreto com o rejeito tendo um desempenho melhor que o do concreto sem o rejeito, ou seja, apresentando menor desgaste nas primeiras idades (30/40 dias). Já nas últimas idades (90/102 dias) os desempenhos dos concretos voltaram aos padrões das anteriores deste item, tendo o concreto com o rejeito apresentado maior desgaste que o concreto sem rejeito. O desempenho parcial dos corpos de prova nos ensaios, valor acumulado no 3º ciclo, pode ser conhecido pelos traços horizontais que cortam as respectivas colunas. Ao término dos ensaios, final do 6º ciclo, o concreto com rejeito, tomado como teste, apresentou aos 40 dias um desgaste de aproximadamente 15% menor que o concreto sem rejeito, aos 30 dias, tomado como referência. Aos 102 dias a situação inverteu-se, tendo o concreto sem rejeito apresentado um desempenho superior ao do concreto com rejeito, que registrou com um desgaste maior, de aproximadamente 4,5%.

8.1.6. Avaliação da absorção por capilaridade

A Figura 8.182 mostra valores e curvas comparativos da absorção de água por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63.

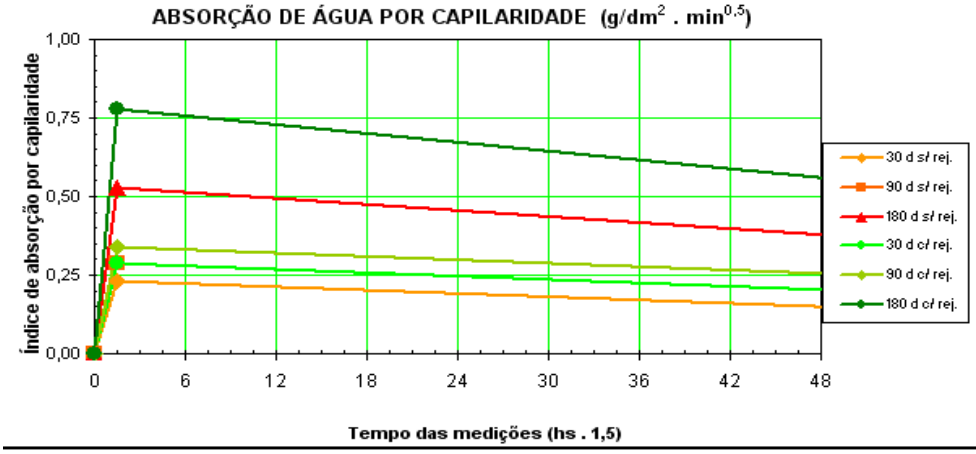
COMPARATIVO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL	CP Refer.	CP Teste
	IDENTIFICAÇÃO	Refer. sem rej.	Teste com rej.
	NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa
	ORIGEM	DEMC	DEMC
	PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO		
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200	Ø100 X 200
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		
	CIMENTO / TRAÇO	CP II E 32 - a/c = 0,63	
	UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

VALORES DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE ($g/dm^2 . min^{0,5}$)

Identificação dos Traços		Refer. sem rejeito média dos cp's por idade			Teste com rejeito média dos cp's por idade		
Idade dos corpos de prova (dias)		30 d s/ rej.	90 d s/ rej.	180 d s/ rej.	30 d c/ rej.	90 d c/ rej.	180 d c/ rej.
Tempo das medições (hs)	0	0	0	0	0	0	0
	1,5	0,23	0,29	0,53	0,29	0,34	0,78
	72	0,11	0,16	0,30	0,16	0,21	0,45

CURVAS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.182 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP II E 32, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.182 que nos concretos com o emprego do cimento CP II – E 32, com fator a/c = 0,63, as curvas representativas da evolução das absorções de

água por capilaridade, nas idades analisadas, apresentam razoável regularidade, mantendo-se as do concreto (contendo o rejeito) sempre superiores às do concreto sem rejeito, considerado como referência. Foi registrada determinada amplitude inicial do conjunto das curvas na medição de 1,5 horas na idade de 30 dias, e certa convergência do conjunto nas medições de 72 horas, em ambos os concretos e para as respectivas idades. Aos 30, 90 e 180 dias de idade as absorções por capilaridade do concreto com rejeito, medidas com 1,5 horas de ensaio, estiveram em 26%, 17% e 47%, respectivamente, maiores que as do concreto sem rejeito. Nas medições de 72 horas de ensaio, aos 30, 90 e 180 dias de idade dos concretos, esses percentuais aumentaram para 45%, 31% e 50%, respectivamente.

A Figura 8.183 mostra valores e curvas comparativos da absorção de água por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63.

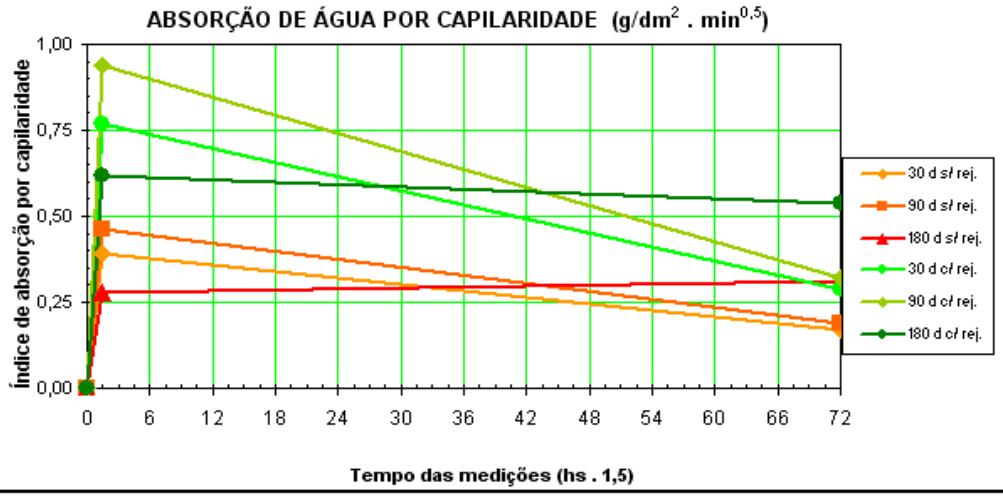
COMPARATIVO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL	CP Refer.	CP Teste
	IDENTIFICAÇÃO	Refer. sem rej.	Teste com rej.
	NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa
	ORIGEM	DEMC	DEMC
	PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO		
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200	Ø100 X 200
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		
	CIMENTO / TRAÇO	CP IV 40 RS - a/c = 0,63	
	UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

VALORES DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE ($g/dm^2 . min^{0,5}$)

Identificação dos Traços		Refer. sem rejeito – média dos cp's por idade			Teste com rejeito – média dos cp's por idade		
Idade dos corpos de prova (dias)		30 d s/ rej.	90 d s/ rej.	180 d s/ rej.	30 d c/ rej.	90 d c/ rej.	180 d c/ rej.
Tempo das medições (hs)	0	0	0	0	0	0	0
	1,5	0,39	0,46	0,28	0,77	0,94	0,62
	72	0,17	0,19	0,31	0,29	0,32	0,54

CURVAS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.183 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,63
Fonte: O autor, 2015.

Embora na Figura 8.183, aparentemente, o gráfico demonstre curvas com variados graus de inclinação, observa-se que nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,63, as curvas representativas da evolução das absorções por capilaridade, nas idades analisadas, apresentam comportamento semelhante ao verificado na figura anterior, porém com percentuais bem mais elevados. Aos 30, 90 e 180 dias de idade as absorções por capilaridade do concreto com rejeito, medidas com 1,5 horas de ensaio, estiveram em 97%, 104% e 121%, respectivamente, maiores que as do concreto sem rejeito. Nas medições de 72 horas de ensaio, aos 30, 90 e 180 dias de idade dos concretos, estes percentuais diminuíram-se bastante, para casa dos 70%, 68% e 74%, respectivamente, mas ainda superiores às absorções do concreto sem rejeito.

A Figura 8.184 mostra valores e curvas comparativos da absorção de água por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52.

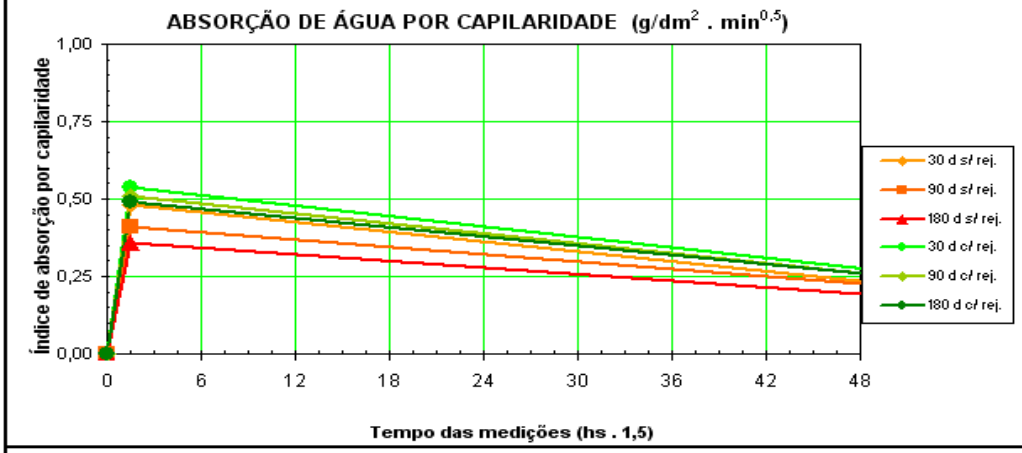
COMPARATIVO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

INFORMAÇÕES GERAIS	MATERIAL	CP Refer.	CP Teste
	IDENTIFICAÇÃO	Refer. sem rej.	Teste com rej.
	NATUREZA	Pesquisa	Pesquisa
	ORIGEM	DEMC	DEMC
	PROPRIETÁRIO	Ayrton	Ayrton
	PESO MÉDIO		
	DIMENSÃO NOMINAL (mm)	Ø100 X 200	Ø100 X 200
	DIMENSÃO MÉDIA (mm)		
	CIMENTO / TRAÇO	CP IV 40 RS - a/c = 0,52	
	UTILIZAÇÃO	Concreto usual plástico	Concreto usual plástico

VALORES DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE ($g/dm^2 . min^{0,5}$)

Identificação dos Traços		Refer. sem rejeito – média dos cp's por idade			Teste com rejeito – média dos cp's por idade		
Idade dos corpos de prova (dias)		30 d s/ rej.	90 d s/ rej.	180 d s/ rej.	30 d c/ rej.	90 d c/ rej.	180 d c/ rej.
Tempo das medições (hs)	0	0	0	0	0	0	0
	1,5	0,48	0,41	0,36	0,54	0,51	0,49
	72	0,11	0,13	0,11	0,14	0,13	0,14

CURVAS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



OBSERVAÇÕES:

Figura 8.184 – Valores e curvas comparativos de avaliação de absorção por capilaridade de concretos – referência sem rejeito e teste com rejeito – CP IV 40 RS, a/c 0,52
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se na Figura 8.184 que, nos concretos com o emprego do cimento CP IV – 40 RS, com fator a/c = 0,52, as curvas representativas da evolução das absorções por capilaridade, nas idades analisadas, apresentam grande regularidade, mantendo-se as

do concreto (com o rejeito) sempre superiores às do concreto sem rejeito, considerado como referência. Não foram registradas grandes variações entre um e outro concreto, tendo-se verificado muita proximidade entre os valores de cada concreto nas idades ensaiadas. Aos 30, 90 e 180 dias de idade as absorções por capilaridade do concreto com rejeito, medidas com 1,5 horas de ensaio, estiveram na ordem dos 12%, 24% e 36%, respectivamente, maiores que as do concreto sem rejeito. Nas medições de 72 horas de ensaio, aos 30, 90 e 180 dias de idade dos concretos, esses percentuais aumentaram para 27%, 0% e 27%, respectivamente.

8.2. Discussões finais

A partir dos quadros apresentados no item 8.1 foi montada a Tabela 8.69, na qual foram cotejados para cada ensaio físico realizado, em cada traço de concreto com o rejeito e em suas respectivas idades, o percentual superior ou inferior do desempenho observado em relação àquele do seu traço de referência, considerado o sem o emprego do rejeito em estudo. Para facilitar a visualização também foram destacados, em duas tonalidades distintas, os valores de desempenhos, qualitativamente considerados superiores ou inferiores, conforme positivo ou negativo o valor de seu percentual.

Tabela 8.69 – Percentuais de desempenho em relação ao traço referência (Sem Rejeito)

PERCENTUAIS DE DESEMPENHO EM RELAÇÃO AO TRAÇO REFERÊNCIA (SEM REJEITO)												
Ensaio	Traço	Condição		Desempenho	Idades (dias) 14	28	30	4X	90	10X	180
Resist. Compres	CP 32 0,63	Com Rejeito		(+) >> superior (-) >> inferior	- 27,5	- 7			- 7		- 2,5
	CP 40 0,63				- 6	- 5			- 7,5		- 3,5
	CP 40 0,52				+ 5	+ 10			+ 9		+ 9
Resist. Tração	CP 32 0,63	Com Rejeito		(+) >> superior (-) >> inferior		- 1			+ 26		- 9,5
	CP 40 0,63					- 3			- 1		- 0,5
	CP 40 0,52					+ 14,5			+ 14		+ 15
Mód. Elastic.	CP 32 0,63	Com Rejeito		(+) >> superior (-) >> inferior		- 14,5			- 10		- 17,5
	CP 40 0,63					- 3,5			- 12		- 17
	CP 40 0,52					- 6			- 6		- 4,5
Abras. Seca	CP 32 0,63	Com Rejeito		(+) >> inferior (-) >> superior		- 37			- 9		
	CP 40 0,63					- 3			+ 1		
	CP 40 0,52					+ 36			+ 33		
Abras. Hidr.	CP 32 0,63	Com Rejeito		(+) >> inferior (-) >> superior				+ 15		+ 7	
	CP 40 0,63							+ 15		+ 6	
	CP 40 0,52							- 15		+ 4,5	
Absorção Capilaridade	CP 32 0,63	Com Rejeito	1,5 hs	(+) >> inferior (-) >> superior			+ 26		+ 17		+ 47
			72 hs				+ 45		+ 31		+ 50
	CP 40 0,63		1,5 hs				+ 97		+ 104		+ 121
			72 hs				+ 70		+ 68		+ 74
	CP 40 0,52		1,5 hs				+ 12		+ 24		+ 36
			72 hs				+ 27		0		+ 27

Fonte: O autor, 2015.

No que tange à resistência à compressão axial, os concretos com fator a/c = 0,63, contendo o rejeito, independente do tipo de cimento utilizado, apresentaram resistências inferiores aos respectivos concretos de referência, fato que, aliás, ratificou os resultados encontrados nos respectivos ensaios anteriores desenvolvidos por COSTA (2009) e apresentados na Tabela 4.1.

Apenas o concreto com o cimento CP IV – 40 RS, a/c=0,52, apresentou valores superiores ao concreto de sua referência, possivelmente devido à resistência elevada alcançada em sua matriz, capaz de compensar o somatório das seções fragilizadas do agregado rejeito. Cabe aqui reportar ainda as considerações de LIMA e HELENE

(2001), os quais concluem que *de uma maneira geral, fica evidente que a zona de transição pasta/agregado não tem grande influência nas propriedades do concreto.*

Tendo em vista os percentuais de redução de desempenho apresentados na Tabela 8.69 (não superiores a 8%) sobre a possibilidade de se dosar concretos, utilizando o rejeito de *sinter feed* em condições específicas, é possível concluir que a eventual fragilidade do agregado rejeito não será suficiente para comprometer a resistência efetivamente desejada para uma determinada seção do concreto.

No tocante à resistência à tração por compressão diametral, os resultados obtidos guardam plena coerência com o observado na compressão axial e, possivelmente, pelas mesmas possibilidades apresentadas. A ocorrência verificada no traço com o cimento CP II – E 32, a/c = 0,63, contendo o rejeito, aos 90 dias de idade, especialmente pela sua magnitude, pode ser considerada como um desvio de razão não identificada ou previsível, merecendo em estudos futuros uma reavaliação para sua elucidação. Aqui também os percentuais de redução de desempenho apresentados na Tabela 8.69 propiciam concluir na mesma linha anterior. No que tange ao resultado observado de valor de +26% registrado no concreto com o cimento CP II – E 32, pode-se afirmar ser ele significativo e bem vindo quando o foco é durabilidade e vida útil dos concretos produzidos à luz da ABNT NBR 6118. Obviamente, em se tratando de resultado isolado, será necessário realizar testes futuros para comprovar e atestar esta tendência, haja vista que, via de regra, o uso do rejeito induz a uma perda de resistência à tração motivada pela fragilidade das fases geradas via hidratação observadas nas interfaces.

Com relação ao módulo de elasticidade dinâmico, avaliado a partir de ensaios via frequência ressonante, observou-se que todos os concretos com o emprego do agregado rejeito apresentaram desempenho inferior aos seus concretos de referência, independente do tipo de cimento e do fator a/c empregado. Sabe-se, pela bibliografia existente e especificidade do ensaio que, na presença de poros, vazios ou descontinuidades, a onda ultrassônica é refletida, reduzindo sua velocidade entre os transdutores, variação esta que implicará em alterações nas aplicações consideradas, seja resistência do concreto, avaliação do módulo de elasticidade dinâmico e homogeneidade, entre outros.

Aqui também se observa certo equilíbrio nos percentuais destacados, com realce para o desempenho menos inferior do concreto com o cimento CP IV 40 – RS, a/c = 0,52, que apresentou valores todos menores que os demais. O limite inferior dos percentuais foi de 18% que, em vista dos valores efetivos alcançados pelos concretos de referência, ainda propiciam concluir da possibilidade de produzir concretos utilizando o agregado rejeito de *sinter feed* que alcancem módulos de elasticidade que atendam especificações de projeto.

Com referência à resistência dos concretos com rejeito à abrasão seca, fator a/c = 0,63, excetuando-se o traço do concreto com o cimento CP IV – 40 RS, à idade de 90 dias, que apresentou um desgaste de apenas 1% maior que o seu concreto de referência, o que se observou foi um comportamento contrário em relação aos registrados nos ensaios de compressão simples. Nos ensaios à compressão axial simples, em que os concretos com rejeito apresentaram um comportamento inferior aos seus respectivos de referência, nos ensaios de abrasão seca ocorreu o inverso. Ocorrência idêntica foi verificada nos concretos do cimento CP IV – 40 RS, fator a/c=0,52, cujo comportamento no ensaio de resistência à abrasão seca foi contrário ao comportamento no ensaio de resistência à compressão axial.

Neste particular observa-se também uma significativa diferença entre as performances dos concretos apresentadas na Tabela 4.3 (concretos secos, vibro-prensados) e os da presente pesquisa (concretos plásticos, vibrados) onde, certamente, as elevadas energias de vibração e prensagem obtidas em equipamentos hidráulicos, aliadas ao baixo fator a/c daqueles concretos, alterem sensivelmente tais comportamentos.

Quanto aos comportamentos nos ensaios de resistência à abrasão hídrica, excetuando-se o registrado no traço do CP IV – 40 RS, com rejeito, fator a/c=0,52, idade 4x, todos os concretos com rejeito apresentaram comportamento inferior a seus respectivos de referência. Reitera-se que a possível explicação para tal ocorrência pode estar no fato da significativa porosidade da goethita presente no rejeito, que reduz a compacidade do agregado, tornando-o também muito friável. Esta situação é agravada na presença de água.

As imagens seguintes (Figura 8.185) ilustram, razoavelmente, os pressupostos acima.

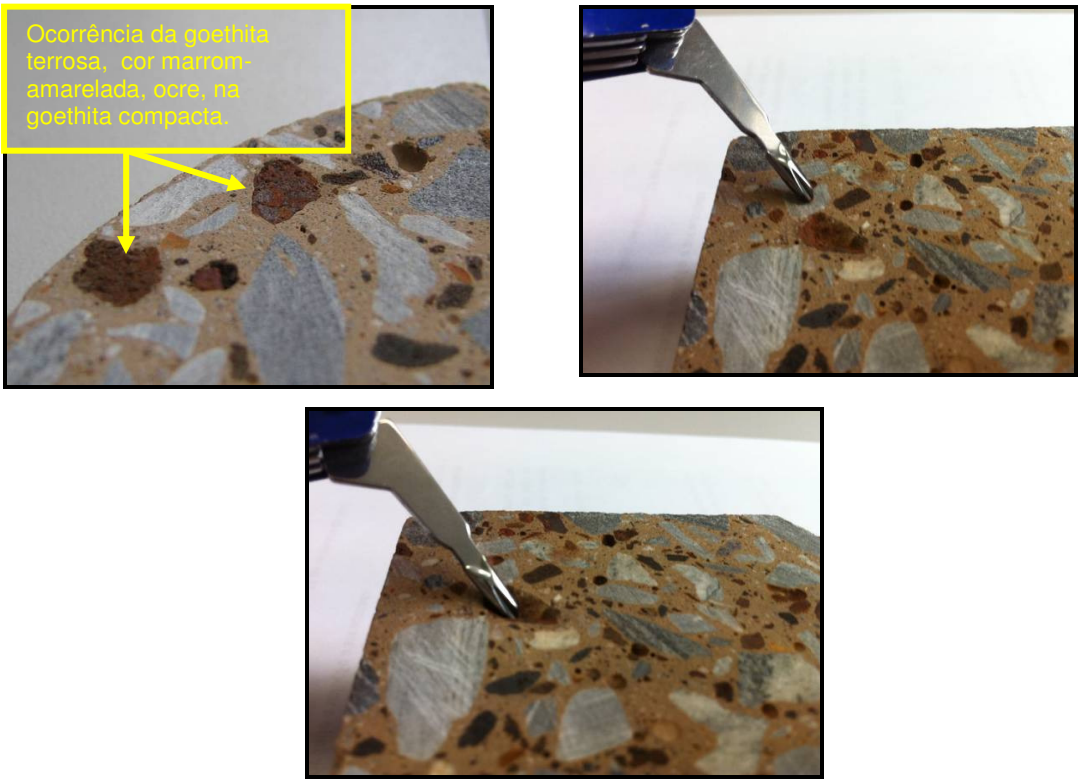


Figura 8.185 – Ocorrência da goethita terrosa, na partícula do rejeito, ilustrando aspecto de sua condição friável
Fonte: O autor, 2015.

Observa-se que ao ser friccionado com um objeto pontiagudo, enquanto o agregado calcário, ao lado, é apenas riscado, o rejeito pode ter sua superfície rompida e penetrada.

Quanto aos comportamentos nos ensaios de absorção por capilaridade, pelos aspectos já considerados anteriormente, devidos à característica de porosidade do agregado, todos os concretos apresentaram desempenho inferior aos seus respectivos de referência, possivelmente pelo concurso de dois fatores: o primeiro, a porosidade do agregado, o que o habilita à absorção, naturalmente; o segundo pelo fato de que não esteve nos objetivos desta pesquisa a produção de concretos, convenientemente dosados para sua impermeabilidade. Aqui também, reportando LIMA e HELENE (2001) que observam em seus experimentos que *quanto maior o volume de pasta no concreto, maior a absorção por capilaridade*.

Entendendo-se terem sido avaliados os ensaios comparativos de resistência à compressão, de resistência à tração por compressão diametral, do módulo de elasticidade dinâmico e de abrasão seca e sob água, além da avaliação da absorção de água por capilaridade nos concretos produzidos com e sem o rejeito de *sinter feed*, segue-se a conclusão obtida.

9. CONCLUSÕES

Por todas as considerações anteriores, pode-se concluir que não apenas os objetivos específicos elencados foram alcançados, mas principalmente o objetivo geral, que consistiu em avaliar a tipologia da interface e validar o emprego deste rejeito como agregado para o concreto foram colimados nas seguintes considerações:

- A microestrutura da interface pasta/agregado da argamassa e dos concretos estudados, particularmente, aquelas nas quais se registra o emprego do rejeito de *sinter feed,* em seus respectivos traços e tipos de cimento empregados, apresenta as fases cimentícias hidratadas euédricas pouco desenvolvidas, apresentando um certo atrofiamento em sua morfologia clássica, diferente da exuberância do que se tem observado na vasta bibliografia e trabalhos conhecidos.

- O emprego do rejeito de *sinter feed* como agregado nos concretos de consistência plástica, com vistas à melhoria de seu desempenho na abrasão hídrica, carece de avaliação mais ampla, inclusive, quanto à caracterização específica e escolha do rejeito do *sínter feed* empregado (incidência das variedades conhecidas do mineral goethita).

- É viável o emprego do rejeito de *sinter feed* como coadjuvante integrante das mesclas dos agregados na produção de concretos, em circunstâncias e finalidades específicas, não apenas em função dos desempenhos observados, mas, principalmente, pelas conveniências ecológicas e de sustentabilidade que o seu emprego propicia.

- Técnicas, procedimentos e experimentação de dosagem dos concretos podem compensar fragilidades do agregado rejeito de *sinter feed,* nas ocorrências da goethita terrosa no mesmo.

- O emprego do rejeito de *sinter feed* em estruturas convencionais de edificações (pilares, vigas e lajes), ou ainda alvenarias sobre estas estruturas, pela própria característica de peso do agregado, pode não se mostrar interessante uma vez que demandaria acréscimos no dimensionamento estrutural das mesmas. Uma avaliação que envolva aspectos de custo envolvidos tornar-se-á pertinente.

- Como conclusão final deste trabalho fica comprovado o uso e emprego do rejeito de *sinter feed* na produção de concretos convencionais (f_{ck} até 30MPa).

10. RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Para apresentar a relevância desta pesquisa, faz-se conveniente remeter às considerações introdutórias feitas pelo autor no Capítulo 1 deste trabalho, bem como às referências de publicação sobre a utilização do rejeito de *sinter feed* apresentadas no Capítulo 4 deste trabalho, que tratou do histórico e do estado da arte do emprego desse material.

O Brasil é um país que apresenta enorme vocação e desempenho para a atividade minerária, tendo na exportação do minério de ferro sua *commodity* de maior expressão e mais relevante papel em sua balança comercial. Dados dessa condição podem ser conhecidos com detalhes no Informe Mineral do 1º semestre/2015, apresentado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Segundo o Informativo, entre o 1º semestre de 2014 e o 1º semestre de 2015, o valor das exportações de minério de ferro caiu algo em torno de 49%, tendo sido cotado em US$65/t, valor este correspondente a 1/3 do seu maior valor no mercado internacional ocorrido em 2011. Não obstante, houve um aumento da quantidade exportada em cerca de 7%.

A demanda de aço no mundo é crescente e passa (espera-se que momentaneamente) por uma realidade de mercado em que o preço desta *commodity* reflete seu menor índice de preços nos mercados internacionais. Impõe-se desta forma que, para a manutenção ou minoração desse efeito sobre a balança de pagamentos e necessidades do país, o aumento do volume exportado seja considerado. Contudo, com a consequente geração sempre associada, será ampliado o volume de rejeitos.

Circunstancialmente, ou não, não têm sido raros os acidentes de ruptura de barragens de rejeitos em nossas plantas de mineração, por vezes ocorridos em épocas nas quais se processam aumentos do volume barrado, ou de obras de alteamento dessas barragens para o consequente aumento de suas capacidades.

Embora não seja rejeito de barragem, mas um rejeito estocado em pilhas, o material objeto desta pesquisa insere-se perfeitamente nas preocupações de danos ao meio ambiente pela quantidade de seu volume gerado. Para cada tonelada de minério de ferro é produzida em média 0,5 toneladas de rejeitos, sendo a razão gravimétrica entre o produto final e os rejeitos produzidos de 2:1 (BOSCOV, 2008) (Figura 10.186).

Seu estoque em pilhas impõe, dentre outros requisitos e condicionantes, a supressão de extensas áreas de cobertura vegetal, causando, evidentemente, desequilíbrio localizado nas condições naturais e danos ao meio ambiente. Portanto requer, tal como para todos os demais rejeitos e resíduos, estudos e pesquisas que visem seu aproveitamento, minorando tais consequências e gerando ganho e riquezas decorrentes da sua utilização responsável.



Figura 10.186 – Vista geral de área de estoque do rejeito de *sinter* feed em pilhas
Fonte: O autor, 2006.

A presente pesquisa tem convergência total com os princípios de preservação do meio ambiente e o que preconiza a Lei 12.305, de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual destaca, dentre os aspectos em consonância com os conceitos modernos de gestão de resíduos sólidos contidos na Lei, os seguintes objetivos:

- *Diminuição do uso de recursos naturais no processo de produção de novos produtos* - obtido por meio da redução do consumo das areias naturais;
- *Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos* - obtido por meio da utilização de rejeito do processo de mineração, com a consequente redução do seu volume estocado e custos operacionais;

- *Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados* - obtido por meio de análise e validação de procedimento e tecnologia até então pouquíssimo utilizados;

Neste particular cabe reiterar o que já foi referido em trabalhos anteriores de COSTA (2009):

- Estabelecer, divulgar e desenvolver o mercado para este insumo, explorando como apelo de convencimento as suas vantagens ecológicas e, certamente, as viabilidades econômica e de preço de sua utilização;
- Buscar estabelecer uma política de incentivos fiscais, através de vantagens tributárias, coordenada em nível estadual e municipal, para os produtos, ecologicamente corretos, produzidos com este material (junto às secretarias estaduais de meio ambiente e fazenda).

Enfim, o aprimoramento do conhecimento e sua aplicabilidade prática, especialmente no tocante ao respeito ao meio ambiente, devem ser responsabilidade de todos.

11. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Avaliar a durabilidade, vida útil e desempenho dos concretos produzidos com o rejeito de *sinter feed* a partir dos testes de sanidade e durabilidade prescritos pela normalização internacional, em especial àqueles utilizando ciclagem natural e em solução de sulfato de sódio e/ou magnésio, bem como visualizando alterações na microestrutura das fases geradas pela hidratação, via MEV. Avaliar também no tocante às prescrições estabelecidas na norma ABNT NBR 15.577.

- Avaliar as possíveis implicações do rejeito de *sínter feed* na alcalinidade do concreto fresco e endurecido, e eventuais conseqüências de possíveis variações sobre a morfologia das respectivas fases cimentícias.

- Avaliar o desempenho de concretos e argamassas para o uso como pré-fabricados e pré-moldados em concreto mediante o uso de cimentos de alta resistência do tipo ARI CP V, que, preferencialmente, não possuam nenhuma adição pozolânica em sua composição, do tipo escória de alto-forno, cinzas volantes e argilas calcinadas;

- Avaliar o comportamento de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos a partir dos rejeitos de *sinter feed* e de adições tipo microssílica e metacaulim, inclusive com ênfase nas interfaces pasta/agregado das novas misturas sob a observação da microscopia eletrônica de varredura.

- A partir de estudos de campo específicos deverão ser produzidas amostras em verdadeira grandeza dos produtos e sobre elas realizados testes de recepção, aceitação e marca de conformidade, consoante a normalização técnica pertinente/vigente.

**“A simplicidade tende ao desenvolvimento,
a complexidade à desintegração.”**

Peter Ferdinand Drucker

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 – **Resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10007. **Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.042. **Rochas para revestimento; materiais inorgânicos, determinação do desgaste por abrasão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15577. **Agregados – Reatividade álcali-agregado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739. **Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211. **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7216. **Amostragem de agregados.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7221. **Ensaio de qualidade de agregado miúdo.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7809. **Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9211. **Agregados miúdos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9774. **Agregado - Verificação da reatividade potencial pelo método químico - Método de ensaio**.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR10006. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ACI 201.2R-01. American Concrete Institute. **Guide to Durable Concrete** -sumário. Committee 201: New York, sep. 2000.

ALCÂNTARA, P. de L. S. **Sustentabilidade Ambiental e Habitação para Todos**, Revista CONSTRUINDO, ISSN 2175-7143, Vol. 01 – pg. 36-39, Jan/Jun 2009.

ALONSO, J. L.; WESCHE, K. Characterization of fly ash. In: WESCHE, K. (ed.). **Fly ash in concrete: properties and performance**, Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building. [s.l.]: Rilem, E & FN Spon, p. 3-23, 1991.

ANJOS, L.; COLLINS, C. D.; HOLT, R. D.; VOLPATO, G. H.; MENDONÇA, L. B.; LOPES, E.V.; BOÇON, R.; BISHEIMER, M. V.; SERAFINI, P. P.; CARVALHO, J. Bird species abundance–occupancy patterns and sensitivity to forest fragmentation: Implications for conservation in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v. 144, p. 2213–2222, jun.2011.

ASTM C 1138 M. **Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. Disponível em: www.astm.org.

ASTM C215. **Standard Test Method.** West Conshohocken, Pa: ASTM International, 2008. Disponível em: www.astm.org.

ASTM C33 / C33M-13. **Standard Specification for Concrete Aggregates.** West Conshohocken, Pa: ASTM International, 2013. Disponível em: www.astm.org.

ASTM C88-13. Standard **Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. Disponível em: www.astm.org.

BASÍLIO, F. de A., **Cimento Portland.** Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. São Paulo, 1981.

BLACK, L.; GARBEVA, K.; Stemmermanna, P.; Hallamb, K. R.; Allen, G. C. Erratum to ‘‘Characterisation of crystalline C-S-H phases by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)’’ **Cement and Concrete Research**, v.33, n.6, p.899–911, 2003.

BOSCOV, M. E. G**. Geotecnia** Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, p. 185-207.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** Tese [Doutorado em Engenharia Civil] – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

COSTA, A. V. **Utililização do Rejeito de *Sinter Feed* como Agregado na Produção de Peças de Concreto para Pavimentação**. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil] – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 2. ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1988, v.1.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM: ME 8994 – **Ensaio acelerado de durabilidade do agregado.**

ELSHARIEF, A.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Influence of Aggregate size, Water cement Ratio and Age on the Microstructure of the Interfacial Transition zone. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p.1837-1849, 2003.

HERMITE, R. L. **Proceedings of the Fourth International Symposium on Chemistry of Cements (SCC).** Washington, DC: SCC, 1960.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; TANAKA, R. S.; PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. 55º Cong. Bras. Concreto, IBRACON 1, 2013. **Anais...**

JENSEN, O. M.; BENTZ, D. P.; LURA, P. **Autogenous Deformation of Concrete**. ACI, 2004.

LIMA, E. P.; HELENE, P. R. L. **Influência do Volume de Pasta na Zona de Transição Pasta/Agregado com Relação às Propriedades Mecânicas e de Durabilidade do Concreto.** Boletim Técnico BT/PC/270 – ISSN 0103-9830 – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MAIA, L. V. S. **Ensaios Tecnológicos – Laboratório de Materiais de Construção II**. Centro de Ciências Tecnológicas – Depto. de Engenharia Civil, p 16. Universidade do Estado de Santa Catarina – Joinvelle 2008.

MALHOTRA, V. M. Introduction: sustainable development and concrete technology. **Concrete International**, v. 24, n. 7, p. 22, 2002.

MASO, J. C. **Proceedings** of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements. Paris: Éditions Septima, 1980.

MEHTA, P. K. Hardened cement paste: microstructure and its relationship o properties. International Congress on the Chemistry of Cement, 8. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 1986, v.3, p.113-121.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MENEZES, A. T. do V. B., **Arte contemporânea no museu:um estudo de caso do Instituto Inhotim**. [Dissertação. Mestrado em Museologia e Patrimônio, p 70]. UNIRIO/MAST, Rio de Janeiro 2012.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete:** microstructure, properties and materials. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008.

MINDES, S.; YOUG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2nd edition – Pearson Education Inc., 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

OLLIVIER, J. P.; MASO, J. C.; BOURDETTE, B. Interfacial Transition Zone in Concrete. **Advanced Cement Based Materials**, v.2. n.1, p.30-38, January 1995.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** [Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Ouro Preto, p 185]. Ouro Preto: UFOP, 2005.

PING, X.; BEAUDOIN, J. J.; BROUSSEAU, R. Flat aggregate-portland cement paste interfaces, I. Electrical conductivity models. **Cement and Concrete Research**, v.21, n.4, p.515-522, July 1991.

PORPHÍRIO, N. H.; BARBOSA, M. I. M.; BERTOLINO, L. C. Tratamento de Minérios. In: PORPHÍRIO, N. H.; BARBOSA, M. I. M.; BERTOLINO, L. C. **Caracterização Mineralógica de Minérios**, capítulo 3. Rio de Janeiro: CETEM, 2010, p.55-84.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Design of heavy industrial concrete pavements**. Information Series 15234.01P. Skokie, Il.: Portland Cement Association, 1988.

POWERS, T. C.; BRUMAUER, S. Concrete. **American Science**, v.50, n.1, p.210-229, 1962.

PRESOTTI, E. S. **Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro.** [Dissertação. Mestrado em Engenharia civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.] Ouro Preto: UFOP, 2002.

RIBEIRO, F. H. M. **Tecnologia do Concreto**: agregados para construção civil. Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP), ULBRA. Palmas, TO, 2009. Disponível em www.ulbra-to.br/DownloadArquivo.aspx?idArquivo=9c6e2514.

SANTOS, L. D.; BRANDÃO, P. R. G. Morphological varieties of goethite in iron ores from Minas Gerais, Brazil. **Minerals Engineering,** v.16, n.11, supplement 1, p.1285-1289, November 2003.

SANTOS, L. D.; BRANDAO, P. R. G.; SAMPAIO, D. A. Mineralogical and morphological characterization of iron ore types from Minas Gerais, Brazil - influences on the specific surface area of concentrates. **Minerals & Metallurgical Processing,** May 1st, 2005.

SCRIVENER, K L; PRATT, P L; **Backscattered Electron Images of Polished Cement Section in the Scanning Electron Microscope**. Proc. 6th int. Conf. On Cement Microscopy, 26 – 29, March 1994, Albuquerque , New Mexico, p. 145 – 155.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Aparente em Atmosfera Urbana**. Ed. Pini, São Paulo, 1995.

.

ANEXOS

Tipo de Produto: REJEITO ITM X

JANEIRO A DEZEMBRO DE 2011

Dia	úmidade		Análise Química (%)																Global
			Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+0.105mm	-0.105mm	
02à15/01/11			44,24	32,12	2,11	0,126	0,22	1,98	10,60	9,80	12,20	24,60	22,60	5,8	3,6	3,0	1,2	6,6	100,00
15à31/01/11			43,96	32,60	1,04	0,084	0,28	1,49	9,90	11,80	12,60	20,40	22,30	4,9	6,0	3,5	0,6	8,0	100,00
01à15/02/11			45,09	30,96	1,02	0,137	0,30	1,64	12,50	9,30	14,10	14,90	25,00	6,6	5,0	3,4	2,6	6,6	100,00
15à28/02/11			44,67	31,60	0,85	0,099	0,36	1,62	9,90	8,90	13,20	13,60	22,80	6,8	7,0	5,4	4,6	7,8	100,00
01à15/03/11			44,37	31,80	0,95	0,106	0,13	1,30	9,60	10,90	11,50	14,50	20,30	7,6	7,4	6,3	5,3	6,6	100,00
15à31/03/11			44,10	32,20	1,64	0,099	0,20	1,51	10,60	9,90	12,60	15,60	23,60	5,9	6,7	5,3	4,3	5,5	100,00
01à15/04/11			33,96	48,45	1,80	0,099	0,10	1,29	12,50	11,80	11,80	14,60	23,60	5,4	6,2	4,9	4,6	4,6	100,00
15à30/04/11			43,80	32,68	2,60	0,098	0,18	2,02	13,50	10,30	15,10	15,90	26,00	5,6	4,0	2,4	1,6	5,6	100,00
01à15/05/11			33,96	47,45	1,68	0,088	0,24	2,39	9,60	11,10	11,90	23,70	23,00	4,8	4,0	3,2	0,8	7,9	100,00
15à30/05/11			41,33	31,30	2,06	0,145	0,22	4,60	8,90	10,90	11,60	24,30	24,30	3,9	5,0	2,5	0,6	8,0	100,00
01à30/06/11			40,12	38,32	2,38	0,112	0,28	1,57	9,90	11,20	12,20	22,60	23,60	2,9	4,6	3,4	0,6	9,0	100,00
01à30/07/11			38,60	39,71	1,38	0,090	0,29	2,11	10,60	12,20	11,90	22,40	23,40	3,2	3,8	3,2	0,7	8,6	100,00
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
Média	#DIV/0!	#DIV/0!	41,52	35,77	1,63	0,107	0,23	1,96	10,68	10,68	12,56	18,93	23,38	5,28	5,28	3,88	2,29	7,07	100,00
Desvio Padrão	#DIV/0!	#DIV/0!	3,88	6,06	0,56	0,02	0,07	0,86	1,35	1,00	1,04	4,23	1,36	1,37	1,28	1,21	1,80	1,30	100,00
Coef.Var.	#DIV/0!	#DIV/0!	0,09	0,17	0,35	0,17	0,31	0,44	0,13	0,09	0,08	0,22	0,06	0,26	0,24	0,31	0,79	0,18	100,00
Val.Máximo	-	-	45,09	48,45	2,60	0,15	0,36	4,60	13,50	12,20	15,10	24,60	26,00	7,60	7,40	6,30	5,30	9,00	100,00
Val.Mínimo	-	-	33,96	30,96	0,85	0,08	0,10	1,29	8,90	8,90	11,50	13,60	20,30	2,90	3,60	2,40	0,60	4,60	100,00

ITAMINAS - LABORATÓRIO
MINA DE JANGADA

ITAMINAS

Tipo de Produto: . REJEITO Jigue MÊS: 3/2013 e 4/2013

Dia	úmidade		Análise Química (%)																Global
			Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+0.105mm	-0.105mm	
01á08/3/13			57,43	12,28	1,30	0,110	0,21	3,61	17,90	10,50	10,50	16,80	22,20	6,30	4,20	3,20	2,10	6,30	100,00
09á16/3/2013			55,73	12,72	1,11	0,101	0,18	5,86	11,20	7,90	18,00	11,20	24,80	7,90	4,50	2,20	2,20	10,10	100,00
17á23/3/2013			54,17	15,30	1,41	0,103	0,18	5,35	8,60	5,40	17,70	10,90	31,00	9,30	3,90	3,10	3,10	7,00	100,00
24á31/3/2013			58,89	11,01	1,27	0,098	0,13	2,96	26,10	11,40	13,60	13,60	21,60	3,40	1,10	2,30	1,20	5,70	100,00
01á06/4/2013			61,49	6,00	1,47	0,060	0,12	3,86	10,70	20,60	13,00	34,40	6,10	..	..	6,10	1,50	7,60	100,00
07á13/04/2013			58,56	8,37	1,00	0,064	0,13	6,30	8,80	9,90	9,90	16,50	27,40	8,80	3,30	5,50	1,10	8,80	100,00
14á20/04/2013			60,12	8,23	1,64	0,080	0,15	3,50	7,80	6,70	19,10	14,60	25,00	6,70	2,20	4,50	2,20	11,20	100,00
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
																			-
Coef.Var.	#DIV/0!	#####	58,06	10,56	1,31	0,09	0,16	4,49	13,01	10,34	14,54	16,86	22,59	7,07	3,20	3,84	1,91	8,10	
Desvio Padrão	#DIV/0!	#####	2,33	2,96	0,20	0,02	0,03	1,22	6,19	4,63	3,46	7,47	7,34	1,95	1,20	1,43	0,65	1,87	
Coef.Var.	#DIV/0!	#####	0,04	0,28	0,15	0,21	0,20	0,27	0,48	0,45	0,24	0,44	0,33	0,28	0,37	0,37	0,34	0,23	
Val.Máximo	-	-	61,49	15,30	1,64	0,11	0,21	6,30	26,10	20,60	19,10	34,40	31,00	9,30	4,50	6,10	3,10	11,20	
Val.Mínimo	-	-	54,17	6,00	1,00	0,06	0,12	2,96	7,80	5,40	9,90	10,90	6,10	3,40	1,10	2,20	1,10	5,70	

ITAMINAS

Tipo de Produto: REJEITO JIGUE MÊS: jan/15

Dia	úmida de	Análise Química (%)																	Global
		Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	9.51mm	7.93mm	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+ 0.105mm	- 0.105mm	
02á10/01/2015	10,0	55,85	10,14	2,74	0,063	0,16	6,75	1,10	3,20	5,40	6,50	11,80	9,70	27,90	7,50	8,60	6,50	3,20	8,60	100,00
11á21/01/2015	12,0	55,21	11,02	2,77	0,078	0,12	6,73	1,00	2,90	5,90	7,40	12,60	8,50	29,90	6,90	9,40	5,40	2,90	7,20	100,00
22á31/01/2015	9,0	55,61	10,14	3,20	0,054	0,14	6,62	1,80	3,40	6,20	8,20	11,20	9,30	28,40	7,20	8,00	6,40	3,00	6,90	100,00

Tipo de Produto: REJEITO JIGUE MÊS: fev/15

Dia	úmida de	Análise Química (%)																	Global
		Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	9.51mm	7.93mm	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+ 0.105mm	- 0.105mm	
02á10/02/2015	8,0	56,61	10,81	1,73	0,068	0,15	6,00	1,10	6,50	11,80	12,90	15,10	10,80	23,60	4,30	4,30	3,20	2,10	4,30	100,00
11á18/02/2015	9,0	57,64	9,45	1,73	0,082	0,16	5,81	3,60	6,00	12,00	15,70	18,10	13,30	18,10	1,20	3,60	2,40	3,60	2,40	100,00
19á28/02/2015	6,0	57,69	8,88	2,15	0,070	0,16	5,89	2,30	4,50	9,10	9,10	10,20	16,50	17,10	5,70	6,80	6,80	5,70	6,20	100,00
																				-

Tipo de Produto: REJEITO JIGUE MÊS: mar/15

Dia	úmida de	Análise Química (%)																	Global
		Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	9.51mm	7.93mm	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+ 0.105mm	- 0.105mm	
02á10/03/2015	9,0	57,03	9,78	2,00	0,071	0,16	6,13	1,80	6,00	10,80	10,80	14,50	12,00	24,90	4,80	3,60	3,60	3,60	3,60	100,00
11á18/03/2015	10,0	57,97	9,07	1,84	0,070	0,16	5,59	2,50	8,60	16,00	17,30	18,60	12,30	14,80	2,50	1,20	1,20	2,50	2,50	100,00
19á31/03/2015	8,0	57,71	8,49	2,38	0,080	0,23	5,90	3,40	6,80	14,80	15,90	15,90	11,40	17,00	2,30	1,10	2,30	3,40	5,70	100,00

Tipo de Produto: REJEITO JIGUE MÊS: abr/15

Dia	úmida de	Análise Química (%)																	Global
		Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	9.51mm	7.93mm	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+ 0.105mm	- 0.105mm	
01á11/04/2015	6,0	57,29	10,19	1,88	0,069	0,17	5,37	3,30	4,10	13,50	13,50	17,60	13,60	20,10	1,40	2,40	1,40	1,40	7,70	100,00
13á20/04/2015	8,0	58,08	10,41	1,77	0,084	0,25	4,38	2,40	7,30	14,60	15,90	15,90	9,80	20,70	3,70	1,20	1,20	1,20	6,10	100,00
21á30/04/2015	7,0	55,73	12,01	2,28	0,071	0,17	5,62	6,20	8,60	14,80	14,80	18,30	12,30	16,40	2,50	1,20	1,20	1,20	2,50	100,00
																				-

Tipo de Produto: REJEITO JIGUE MÊS: mai/15

Dia	úmida de	Análise Química (%)																	Global
		Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	9.51mm	7.93mm	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+ 0.105mm	- 0.105mm	
01á12/05/2015	8,0	57,71	8,49	2,38	0,080	0,23	5,90	2,50	5,10	15,20	16,50	20,10	12,70	17,70	2,50	1,30	1,30	1,30	3,80	100,00
13á20/05/2015	7,0	55,15	13,07	1,75	0,068	0,17	5,77	1,20	6,10	12,20	12,20	15,90	13,40	25,60	3,70	2,40	1,20	1,20	4,90	100,00
21á30/05/2015	8,0	56,72	9,18	2,10	0,089	0,18	7,00	2,40	6,00	12,00	13,30	14,50	10,80	21,80	4,80	3,60	2,40	2,40	6,00	100,00
																				-

Tipo de Produto: REJEITO JIGUE MÊS: jun/15

Dia	úmida de	Análise Química (%)																	Global
		Fe	SiO2	Al2O3	P	Mn	PPC	9.51mm	7.93mm	6.35mm	4.76mm	3.36mm	2.36mm	1.0mm	0.59mm	0.297mm	0.150mm	+ 0.105mm	- 0.105mm	
01á09/06/2015	8,0	55,51	14,10	1,73	0,071	0,27	4,00	4,90	4,90	13,40	14,60	15,90	9,80	20,60	3,70	2,40	2,40	3,70	3,70	100,00
10á18/06/2015	7,0	56,69	11,68	1,89	0,083	0,19	4,20	1,20	4,80	10,70	16,70	16,70	13,10	17,70	3,60	3,60	2,40	2,40	7,10	100,00
19á30/06/2015	7,0	54,76	14,06	2,05	0,096	0,29	4,70	3,70	7,30	10,90	10,90	13,40	9,80	21,90	3,70	4,90	3,70	3,70	6,10	100,00

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil
Telefone: (31) 3489-2000 - Fax: (31) 3489-2200
faleconosco@cetec.br - www.cetec.br

Setor de Medições Ambientais

Certificado de Ensaio Nº 215537

Folha 1/2

LABORATÓRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Cliente: Fundação Cristhiano Ottoni

Endereço: Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – Escola de Engenharia (Bloco I)
Pampulha
31270-901 Belo Horizonte, MG

Guia de Autorização de Serviços (GAS) Nº: 59772

Objeto: 01 (uma) amostra de resíduo sólido

Natureza do trabalho: testes de solubilização e lixiviação de resíduo sólido conforme ABNT NBR 10006/10005-2004

Data de conclusão	Data de emissão
19-08-2011	23-08-2011

Regis Costa Santos
Químico CRQ 2ª Reg. Nº 02101335
Responsável pelo Laboratório

José Antônio Cardoso
Químico CRQ Nº 02100296
Coordenador do SAM/CETEC

Os resultados apresentados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) descrita(s) no item 1.
Nas situações aplicáveis, o arredondamento dos nºs apresentados neste certificado foi realizado segundo as prescrições da NBR 5891/1977.
O CETEC autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil
Telefone: (31) 3489-2000 - Fax: (31) 3489-2200
faleconosco@cetec.br - www.cetec.br

Setor de Medições Ambientais

Certificado de Ensaio Nº 215537

1 Identificação da amostra

Laboratório	Cliente
59772/1960	Rejeito final de "Sinter FEED" origem da mina Jangada em Sarzedo/MG (coleta em Outubro/2010).

2 Resultados

2.1 Teste de solubilização

Determinação /unidade	Amostra nº		Método de ensaio
	59772/1960 A	59772/1960 B	
pH do extrato solubilizado	4,11	5,80	SM 4500 H^+ B
Sólidos secos / %	100	100	ABNT NBR 10005/2004

2.2 Teste de lixiviação

Determinação /unidade	Amostra nº	Método de ensaio
	59772/1960	
pH do extrato lixiviado	4,98	SM 4500 H^+ B
Tempo de teste / h	19:14	—
Sólidos secos / %	100	ABNT NBR 10005/2004

3 Referência bibliográfica

3.1 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

4 Observações

4.1 Os resultados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo cliente.

4.2 Contratante dos serviços: Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa - FUNDEP
Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 – Unidade Administrativa II/4° andar
Pampulha
31270-901 Belo Horizonte, MG

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil
Telefone: (31) 3489-2000 - Fax: (31) 3489-2200
faleconosco@cetec.br - www.cetec.br

Setor de Análises Químicas

Certificado de Ensaios Nº 628630

Folha 1/3

LABORATÓRIO DE TRAÇOS METÁLICOS

Cliente: Fundação Cristhiano Ottoni
Av.Presidente Antônio Carlos 6627 – Escola de Engenharia (Bloco I)
Pampulha
31270-901 Belo Horizonte - MG

Guia de Autorização de Serviços (GAS) Nº: 76335

Objeto: uma amostra de resíduo sólido

Natureza do trabalho: determinação quantitativa de Ag, Ba, Cr, Al, Ba, Cu, Fe, Mn, Na por espectrometria de emissão atômica por plasma, Cd, Pb por espectrometria de absorção atômica com forno de grafite, As, Se por espectrometria de absorção atômica com gerador de hidretos e Hg por espectrometria de absorção atômica com vapor frio, normasdo sistema de qualidade CETEC.

Data de recebimento	Data de conclusão	Data de emissão
18-8-2011	19-9-2011	19-9-2011

Olguita G. Ferreira Rocha
CRQ/MG 02100224
Responsável Laboratório de Traços Metálicos
Coordenadora do Setor de Análises Químicas

Os resultados apresentados referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) enviada(s) pelo cliente.
O CETEC autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral.

Setor de Análises Químicas CETEC

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil
Telefone: (31) 3489-2000 - Fax: (31) 3489-2200
faleconosco@cetec.br - www.cetec.br

Setor de Análises Químicas

Certificado de Ensaios Nº 628630

Folha 2/3

1 Identificação das amostras

Id. Laboratório	Id. Cliente		
	Descrição	Data da coleta	Extrato
76335/9300	Rejeito Final de Sinter Feed (após Jigue). Mina de Jangada - Sarzedo-MG	17/08/2011	Lixiviado
76335/9301	Rejeito Final de Sinter Feed (após Jigue). Mina de Jangada - Sarzedo-MG	16/08/2011	Solubilizado A
76335/9302	Rejeito Final de Sinter Feed (após Jigue). Mina de Jangada - Sarzedo-MG	16/08/2011	Solubilizado B

2 Resultados

Id. Laboratório	Resultados Lixiviado									
	Ag mg/L		Ba mg/L		Cr mg/L		Cd mg/L		Pb mg/L	
	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza
76335/9300	<0,01	1,3E-06	0,0321	0,0038	<0,04	2,4E-03	<0,0005	5,0E-05	<0,005	3,0E-04

Id. Laboratório	Resultados Lixiviado					
	As mg/L		Se mg/L		Hg µg/L	
	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza
76335/9300	<0,0003	4,2E-05	<0,0005	7,5E-05	<0,20	2,4E-02

Id. Laboratório	Resultados Solubilizado									
	Ag mg/L		Al mg/L		Ba mg/L		Cr mg/L		Cu mg/L	
	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza
76335/9301	<0,01	1,3E-06	<0,10	8,0E-03	0,0125	0,0015	<0,04	2,4E-03	<0,004	4,4E-04
76335/9302	<0,01	1,3E-06	<0,10	8,0E-03	0,0124	0,0015	<0,04	2,4E-03	<0,004	4,4E-04

Setor de Análises Químicas CETEC

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
Av. José Cândido da Silveira, 2000 - Bairro Horto
31170-000 - Belo Horizonte - MG - Brasil
Telefone: (31) 3489-2000 - Fax: (31) 3489-2200
faleconosco@cetec.br - www.cetec.br

Setor de Análises Químicas

Certificado de Ensaios Nº 628630

Folha 3/3

Id. Laboratório	Resultados Solubilizado									
	Fe mg/L		Mn mg/L		Na mg/L		Zn mg/L		Cd mg/L	
	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza
76335/9301	<0,30	3,6E-03	0,287	0,011	0,972	0,019	<0,02	3,0E-03	<0,0005	5,0E-05
76335/9302	<0,30	3,6E-03	0,264	0,011	0,439	0,040	<0,02	3,0E-03	<0,0005	5,0E-05

Id. Laboratório	Resultados Solubilizado							
	Pb mg/L		As mg/L		Se mg/L		Hg µg/L	
	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza	Resultado	Incerteza
76335/9301	<0,005	3,0E-04	<0,0003	4,2E-05	<0,0005	7,5E-05	<0,20	2,4E-02
76335/9302	<0,005	3,0E-04	<0,0003	4,2E-05	<0,0005	7,5E-05	<0,20	2,4E-02

3 Caracteristicas dos instrumentos utilizados no ensaio

3.1 Espectrômetro de emissão por plasma, marca Perkin Elmer, modelo ICP Optima 3000 (STQ 201.00).

3.2 Espectrômetro de absorção atômica com forno de grafite, marca Perkin Elmer, modelo Z5100 (STQ 102.00).

3.3 Espectrômetro de absorção atômica com geração de hidretos e com vapor frio, marca Perkin Elmer, AAnalyst 100 (STQ 203.00), com MHS 10 (STQ 206.00).

4 Condições operacionais

4.1 Ensaios realizados dentro de uma área limpa, classe ISO-7, com ilhas de fluxo laminar classe ISO-6.

4.2 Água utilizada foi purificada utilizando Milli-Q. Reagentes purificados por subebulição.

5 Técnicos

5.1 Adilson Rosa Filho - CRQ/MG 02411183

5.2 Eduardo Henrique Martins de Oliveira – CRQ/MG 02411945

5.3 Geraldo do Carmo - CRQ/MG 02400776

5.4 Olguita G. Ferreira Rocha - CRQ/MG 02100224

5.5 Pollyanna Gomes Coelho CRQ/MG PR400090

6 Observações

6.1 Resultados expressos como "<(valor)" referem-se aos limites de quantificação dos métodos.

6.2 A incerteza expandida (U expandida) refere-se a um intervalo de confiança de aproximadamente 95% e é declarada como a incerteza padrão multiplicada por um fator de abrangência (K) igual a 2.

6.3 A incerteza expandida foi determinada segundo as prescrições do EURACHEM/CITAC Guide (2000), considerando-se os seguintes componentes: preparo padrões analíticos, curva analítica, preparo da amostra, repetitividade e reprodutibilidade.

7 Contratante do Serviços:

Fundep – Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa
Av. Antônio Carlos 6627 – Campus da UFMG
31270-901 Belo Horizonte - MG

LABORATÓRIO MINIMAX LTDA

Ao Senhor

AYRTON VIANA COSTA
Amostra: 1766

Análise de Agregado – Reatividade Potencial pelo Método Químico

1- Sílica dissolvida

Sd.....3 milimoles/litro

2- Redução da Alcalinidade

Ra.....500 milimoles/litro

Belo Horizonte,22/12/2011

LABORATÓRIO MINIMAX LTDA
César Salviano da Costa
Engº Agrº - CREA MG 15*95/D

Rua Mário Coutinho, 10 – Estoril – BH – MG//CEP 30570-310
Telefax (31) 3374-8100//Celular 8828-8826//minimax@oi.com.br

SOLOCAP	RELATÓRIO DE SERVIÇOS	DATA: 14/11/2006 RELATÓRIO Nº: 657-06 FOLHA: 01

1. CLIENTE: AYRTON VIANNA COSTA
2. OBJETO: ENSAIOS GEOTÉCNICOS
3. OBRA: ESTUDO DE VIABILIDADE DO AGREGADO
4. TRECHO: -
5. APRESENTAÇÃO:

A Solocap Tecnologia e Serviços de Engenharia apresenta neste relatório Nº 657-06, os resultados dos ensaios geotécnicos executados em amostras enviadas ao nosso laboratório de sua obra acima identificada.

6. AMOSTRAS RECEBIDAS:

AMOSTRA	MATERIAL	PROCEDÊNCIA
01	Rejeito Sinter Feed	Mina de Jangada – Itaminas - Sarzedo

7. ENSAIOS EXECUTADOS:

ORDEM	ENSAIOS	QTD	MÉTODO
01	Durabilidade (Sulfato de Magnésio)	01	DNER-8994

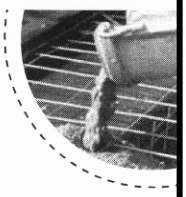
8. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS:

ENSAIOS	UND	RESULTADO	
		ENCONTRADO Amostra 1	ESPECIFICADO
Durabilidade (Sulfato de Magnésio)	%	2,01	< 12

Belo Horizonte, 14 de Novembro de 2006.

Solocap Tecnologia e Serviços de Eng. Ltda.
Cristiano Costa Moreira - CREA 61.510

SOLOCAP - Tecnologia e Serviços de Engª Ltda - Rua Ana Cândida, 34 - Novo Salgado - CEP: 30350-020
Office e Lab. - Av. dos Andradas, 99 - Alto dos Pinheiros - CEP: 30350-720 - Belo Horizonte - MG - Fone: (31) 3375-8666 - Fax: (31) 3375-8618
e-mail: solocap@solocap.com.br Site: www.solocap.com.br



MASTERMIX® BF 40

Aditivo plastificante polifuncional

Aditivo para concreto, líquido pronto para o uso e livre de cloretos. Indicado para a produção de concreto uniforme e com maior qualidade. Possui em sua composição componentes que atuam como dispersantes do material cimentício, propiciando grande redução de água sem alteração do tempo de pega do concreto. Compatível com todos os tipos de cimento Portland. Atende os requisitos das normas brasileiras NBR 11768 (tipo P) e ASTM C494 (tipo A).

Propriedades e Benefícios

Estado Fresco	Estado Endurecido
- Aumento da coesão e redução da segregação;	- Aumento da resistência à compressão;
- Aumento da trabalhabilidade do concreto;	- Aumento da resistência à flexão;
- Incremento da manutenção de slump;	- Aumento do módulo de elasticidade;
- Facilita o adensamento e o lançamento;	- Aumento da durabilidade do concreto;
- Facilita o bombeamento;	- Melhor acabamento do concreto endurecido;
- Reduz o fator A/C*.	- Redução de permeabilidade;
	- Redução de retração e fissuras.

Campos de Aplicação

MASTERMIX® BF 40 é recomendado para uso em todos os tipos de concreto onde é desejada a redução da água de amassamento e incremento nas resistências à compressão e flexão, tais como:

- Concretos usinados em geral (dosados em centrais, barragens, rodovias, etc.);
- Concretos reforçados, pré-fabricados, bombeados, fluidos;
- Concreto protendido;
- Concretos para reparações de superfícies de pontes;
- Concreto aparente.

Modo de Utilização

Para assegurar que as características técnicas do sistema sejam atendidas, sugerimos a consulta na ficha técnica que está disponível no site: www.basf-cc.com.br com todos os procedimentos.

MASTERMIX® BF 40 deve ser adicionado após o final da mistura dos componentes do concreto (cimento Portland, água e agregados, etc.), conjuntamente com a segunda parte da água de amassamento que será utilizada na mistura. Nunca deve ser adicionado aos componentes secos do concreto ou cimento.

Dosagem:

MASTERMIX® BF 40 é um aditivo com características polifuncionais podendo ser dosado em uma ampla faixa, propiciando efeitos diferentes, de acordo com sua aplicação. A faixa de dosagem recomendada de MASTERMIX® BF 40 é de 0,6 a 1,0% s.p.c**. Estas dosagens são orientativas, sendo imprescindível a realização de testes laboratoriais e/ou de campo. A dosagem ótima de MASTERMIX® BF 40 para uma boa redução de água (>10%) pode variar de acordo com a temperatura ambiente, tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, fator A/C*, condições de mistura, tipos de agregados, etc.
O tempo de pega pode ser influenciado pela temperatura e umidade ambientes, bem como pelo aumento da dosagem de MASTERMIX® BF 40. MASTERMIX® BF 40 é compatível com outros aditivos utilizados na fabricação de concretos. Para dosagens fora da faixa recomendada e para maiores informações, entrar em contato com nosso departamento técnico. A limpeza dos equipamentos e ferramentas que foram contaminados com MASTERMIX® BF 40 deve ser feita com água abundante. MASTERMIX® BF 40, quando utilizado com outros aditivos, deve ser adicionado separadamente.

Dados Técnicos	
Função	Aditivo plastificante polifuncional para concreto.
Base Química	Lignosulfonatos e aditivos especiais
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho escuro

Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido castanho escuro	Visual
pH	TM 112 B	7 - 9	-
Densidade	TM 103 B	1, 185 - 1, 225	g/cm³
Sólidos	TM 613 B	40,5 – 44,5	%

Embalagens, Armazenagem e Validade
Caminhão tanque e embalagens de 244 kg - AR3 - V9

Transporte e Segurança - Consultar a página de legendas
TP1 - EPI - FG1 - TX1

fator A/C* - relação entre água e cimento.
s.p.c** - sobre o peso de cimento.

ADITIVOS

Para mais detalhes, consultar a ficha técnica e ficha de segurança em nosso website: **www.basf-cc.com.br**

BASF
The Chemical Company

Departamento de Engenharia Química
Escola de Engenharia
UFMG

Laboratório de Análises Químicas - laq@deq.ufmg.br
Departamento de Engenharia Química - Sala 5514 - BL II
Escola de Engenharia - Campus UFMG Pampulha
Av. Presidente Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte – MG
CEP 31.270-901 – Telefone (31) 3409-1774 – Fax: (31) 3409-1789

LAUDO DE ANÁLISE

Identificação do laudo	Determinação solicitada	Suporte de coleta	Quantidade de amostra
LAQ 00135/15	*Mn*	*Filtro de éster/celulose*	*01*

Identificação do Solicitante

Nome *Ayrton Vianna Costa*
Endereço *Departamento de Engenharia de Materiais de Construção – DEMC*
Cidade *Belo Horizonte* **Estado** *Minas Gerais* **CEP** *31.270-901*
Telefone *(31) 3409-1950* **e-mail** *ayrton@ufmg.br*
Data da solicitação *01/09/2015* **Data do término da análise** *16/09/2015*

Informações da amostra

Amostra	Descrição
001	*Rejeito de sínter feed da Mina de Jangadas – Itaminas / Sarzedo/MG*

Resultados

Amostra	Manganês (µg/g)
001	*< 0,01*

Observações

- O presente resultado é válido somente para a (s) amostra(s) enviada(s), sendo que a amostragem foi realizada pelo interessado sem a participação do laboratório.
- A indicação menor que indica o limite de detecção correspondente ao elemento no aparelho/técnica (GBC Avanta / Absorção Atômica Modo de Chama) empregado na análise, sendo 1 mg = 1000 µg.
- Ensaios realizados de acordo com ABNT NBR 10.006 – 2004 Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.
- O LAQ não se responsabiliza pelo uso indevido ou má interpretação dos resultados aqui apresentados.
- Este relatório só deve ser reproduzido por inteiro. Reprodução de partes requer aprovação por escrita do laboratório.
-

Belo Horizonte, 19 de Setembro de 2015

Responsável Técnico

Alexandre Batista de Almeida
CRQ: 02100872 2ª região

Alexandre Batista de Almeida
Técnico de Laboratório - Insc. UFMG 182.729
Responsável Técnico - CRQ 02100872
Laboratório de Análises Químicas
Departamento de Engenharia Química - EEUFMG

PATTROL

RELATÓRIO PAT-RT-LAB-1302.15-001

ENSAIOS DE LABORATÓRIO

CLIENTE: UFMG

REVISÕES	DESCRIÇÃO	DATA	PREP.	VERIF	APROV
00	Emissão Inicial	03/09/2015	CR	FT	FT

PATROL - INVESTIGAÇÕES GEOTECNICAS LTDA.
Rua Des. Continentino, 68 – Bairro Pedro II – Belo Horizonte – MG
Telefones: 31.3462.0722 – 3462.0079 – 3412.1482

PATTROL	RELATÓRIO PAT-RT-LAB-1302.15-001 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	
CLIENTE:	UFMG	Revisão Nº
PROJETO:	-	00
LOCAL:	-	Página 2 de 4
Ensaios Realizados: Granulometria e Durabilidade.		

Sumário

1. APRESENTAÇÃO 3

2. INTRODUÇÃO 3

3. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS E SERVIÇOS REALIZADOS 3

Tabela 3.1 – Identificação das amostras 3

4. METODOLOGIA APLICADA 3

5. ANEXOS 4

PATROL - INVESTIGAÇÕES GEOTECNICAS LTDA.
Rua Des. Continentino, 68 – Bairro Pedro II – Belo Horizonte – MG
Telefones: 31.3462.0722 – 3462.0079 – 3412.1482

PATTROL	RELATÓRIO PAT-RT-LAB-1302.15-001 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	
CLIENTE:	UFMG	Revisão Nº
PROJETO:	-	00
LOCAL:	-	Página 3 de 4
Ensaios Realizados: Granulometria e Durabilidade.		

1. APRESENTAÇÃO

A Patrol – Investigações Geotécnicas Ltda. é uma empresa de consultoria na área de tecnologia de materiais aplicados as obras de construção. Nosso laboratório está preparado para ensaiar os mais diversos materiais procurando obter os parâmetros técnicos que caracterizam o seu comportamento quando aplicados às mais diversas obras de infra-estrutura. Neste contexto, oferecemos aos nossos clientes a mais avançada tecnologia de ensaios especiais em geotécnica, garantindo a mais elevada qualidade dos resultados aliando-se a rapidez na execução dos ensaios.

2. INTRODUÇÃO

O presente relatório apresenta os resultados de ensaios geotécnicos de laboratório, realizado em amostra deformada.

3. IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS E SERVIÇOS REALIZADOS

A tabela 3.1 discrimina as amostras recebidas e os serviços realizados encontram-se no item 5.

Tabela 3.1 – Identificação das amostras

Registro	Tipo de Amostra
9509	Deformada

4. METODOLOGIA APLICADA

- Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções – ASTM C 88-99

O ensaio de foi realizado de acordo com as norma correspondente.

PATTROL	RELATÓRIO PAT-RT-LAB-1302.15-001 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	
CLIENTE:	UFMG	Revisão Nº
PROJETO:	-	00
LOCAL:	-	Página 4 de 4
Ensaios Realizados: Granulometria e Durabilidade.		

5. ANEXOS

Anexo os resultados e fichas dos ensaios.

Atenciosamente,

Fernando César Tavares
Engenheiro Civil
Patrol Investigações Geotécnicas Ltda.
Telefone (31) 3462.0722

PATTROL	**RELATÓRIO Nº PAT-RT-LAB-1302.15-001** **ENSAIOS DE LABORATÓRIO**	
CLIENTE:	UFMG	Revisão Nº 00
PROJETO:	-	
LOCAL:	-	
Ensaios Realizados: Granulometria e Durabilidade.		

Amostra Registro 9509

PATROL - INVESTIGAÇÕES GEOTECNICAS LTDA.
Rua Des. Continentino, 68 – Bairro Pedro II – Belo Horizonte – MG
Telefones: 31.3462.0722 – 3462.0079 – 3412.1482

PATROL INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS LTDA.

PATTROL

Agregados - Avaliação da Durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou Magnésio

Interessado:	UFMG				
Obra:	-	Proced.:	-		
Data:	03/09/15	Material:	Minerio	Registro:	2015.9509

1. Peneiramento da amostra usada no ensaio de granulometria: 10892,38

Passando mm	Retido mm	Material Retido		Peso das frações antes do ensaio (g)	Peso das frações final do ensaio (g)	Perda (%)	Perda Corrigida (%)
		Peso (g)	% Retido				
Material Passando na peneira de 9,5 mm							
0,15	-	-					
0,3	0,15	261,34	2,4				
0,6	0,3	269,39	2,5				
1,2	0,6	923,53	8,5	110,00	102,37	**6,94**	**0,6**
2,4	1,2	2404,00	22,1	110,00	98,61	**10,35**	**2,3**
4,8	2,4	2898,00	26,6	110,00	98,96	**10,04**	**2,7**
9,5	4,8	2921,07	26,8				
Material retido na peneira de 4,8 mm							
63,5	38	0,00	0,0				
38	19,0	0,00	0,0				
19	9,5	228,43	2,1				
9,5	4,8	2921,07	26,8	300,00	282,89	**5,7**	**1,5**
Perda Total Corrigida(%)							**7,1**

5.2 Material passando na Peneira 3/8" - as frações para o ensaio, pasando em torno de 110g cada uma, são preparadas nas seguintes frações:

Passando	Retido
3/8"	4"
4"	8"
8"	16"
16"	30"
30"	50"

5.3 Material Retido na peneira 4" - as frações para o ensaio são as seguintes:

A) Passando na 2.1/2" retendo na 1.1/2" .....3000 g
B) Passando na 1.1/2" retendo na 3/4" .....1500 g
C) Passando na 3/4" retendo na 3/8" .....1000 g
D) Passando na 3/8" retendo na 4" .....300 g
E) Tamanhos maiores do que 2.1/2, tomam-se frações de 3000 g para cada aumendo de 25 mm.

5.4 Se qualquer das frações especificadas nos itens 5.2 e 5.3, for menor que 5% do peso da amostra, não ensaiar

LIZ CIMENTOS

FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

CIMENTOS LIZ

SUPER CP IV-40 RS

NOME:

Super CP IV-40 RS = Cimento Portland Pozolânico de classe 40 - Resistente à Sulfatos.
Produzidos com os melhores materiais pozolânicos desenvolvidos.
As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, naturais ou artificiais e quando finamente pulverizada e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, dando origem a compostos cimentícios.
Performance supera as especificações técnicas da NBR 5736/1991 ABNT
Atende também a NBR 5737 como cimento Resistente à Sulfatos.

APLICAÇÕES:

=> Argamassas de assentamento e revestimento;
=> Concretos simples, armado, rolado e outros;
=> Lajes e outros artefatos de cimento;
=> Pavimentos e calçadas;
=> Solo-cimento e fundações;
=> Argamassas e concretos expostos à ambientes agressivos.

VANTAGENS:

=> Boa resistência inicial e final;
=> Resistência aos 28 dias superior aos cimentos comuns;
=> Maior durabilidade;
=> Excelente resistência à ambientes agressivos;
=> Especial para obras de saneamento, esgoto e ambientes marinhos;
=> Indicado para grandes obras, como pontes, portos, pavimentos de concreto.

Disponível em embalagem de 50 kg e à granel.

Validade de 3 meses, em local fechado, coberto e seco.

Estocar em pilhas de no máximo 10 sacos, sobre estrados de madeira e distante das paredes.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SUPER CP IV-40 RS :

ENSAIO		UNIDADE	RESULTADO
Finura Blaine		m^2/Kg	460
Tempo de início de pega		min	170
Tempo de fim de pega		min	230
Resistência à compressão	1 dia	MPa	10,5
Resistência à compressão	3 dias	MPa	20,8
Resistência à compressão	7 dias	MPa	26,7
Resistência à compressão	28 dias	MPa	40,8

Para maiores informações, consulte o nosso serviço de atendimento pelo 0800 707 9119.