

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**  
**LABORATÓRIO DE MATERIAIS AVANÇADOS À BASE DE CIMENTO**  
**USP – EESC – SET – LMABC**

**ANA PAULA MORENO TRIGO**

**ESTUDO DA DOPAGEM DE AGREGADOS PARA FINALIDADE DE USO EM**  
**CONCRETOS ESTRUTURAIS**

**São Carlos**  
**2012**



**ANA PAULA MORENO TRIGO**

**ESTUDO DA DOPAGEM DE AGREGADOS PARA FINALIDADE DE USO EM  
CONCRETOS ESTRUTURAIS**

**Tese apresentada à Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Doutora em Engenharia Civil.**

**Área de concentração:**

**Engenharia de Estruturas**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio**

**Versão: corrigida. A versão original  
encontra-se disponível na Escola de  
Engenharia de São Carlos – USP.**

**São Carlos**

**2012**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA  
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Trigo, Ana Paula Moreno  
T828e           Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos  
estruturais. / Ana Paula Moreno Trigo ; orientador Jefferson Benedicto Libardi Liborio. -- São  
Carlos, 2012.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia  
de Estruturas)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Agregados alternativos. 2. Técnica de dopagem. 3. Concreto estrutural. 4. Ensaios  
mecânicos. 5. Ensaios microestruturais. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira ANA PAULA MORENO TRIGO.

Título da tese: "Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais".

Data da defesa: 03/09/2012

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Jefferson Benedicto Libardi Libório (Orientador)**  
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU)

Prof. Dr. **Jorge Luis Akasaki**  
(UNESP – Campus de Ilha Solteira)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. **Alessandra Lorenzetti de Castro**  
(Instituto de Pesquisas Tecnológicas/IPT)

Prof. Dr. **Vladimir Guilherme Haach**  
(Escola de Engenharia de São Carlos-EESC)

Prof. Associado **Márcio Raymundo Morelli**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

### Resultado:

Aprovada

Aprovada : APROVADA

Aprovada

APROVADA

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas):

Profa. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*Amor, apoio, confiança... O sonho alça vôo, ganha altura, acerta, erra, se concretiza. Essa conquista é para meus queridos pais, Jose Carlos e Salete, e para minha irmã, Juliana, motivações desta passagem*

*DEDICO*

## **AGRADECIMENTOS**

---

---

A Deus pela graça da vida, pelo dom do amor e por mais esta conquista.

Aos meus pais, Salete Moreno Pereira Trigo e José Carlos Pereira Trigo Júnior por tornarem possíveis os passos deste caminho e por estarem sempre a postos nos momentos de adversidades.

À minha irmã, Juliana Moreno Trigo, pelo perene apoio.

Ao Prof. Dr. Jefferson Benedito Libardi Liborio pela confiança, orientação e apoio durante estes 4 anos em que trabalhamos juntos. Muito mais que um orientador, um grande amigo.

A toda minha família que torceu, mesmo de longe, pela concretização deste sonho.

À Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

Aos colegas de laboratório, Markus Samuel Rebmann, Rodrigo Vieira da Conceição e Patrícia de Oliveira Rocha, pelas horas de discussão sobre as pesquisas em andamento, pela ajuda prática e pela amizade.

Aos colaboradores do LMABC, Jorge Bravo e Wilson Moreira, e aos estagiários, William e Paulo, pela ajuda e cooperação nos experimentos desenvolvidos.

Ao amigo Delcídio Ramos Campos (Jipinho) por auxiliar na coleta e no transporte a barco do agregado laterítico em Santa Rita D'Oeste/SP.

Aos professores Jefferson Liborio, João Adriano Rossignolo, José Carlos Cintra, José Samuel Giongo, Libânio Pinheiro e João Bento de Hanai, pelos valiosos ensinamentos transmitidos nas disciplinas cursadas durante o doutorado. Também ao Departamento de Estruturas da EESC e a toda a sua equipe administrativa.

Ao professor Dr. Oswaldo Augusto Filho do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, pelo valioso empréstimo do microscópio ótico digital, fundamental na análise microestrutural das amostras. Também aos técnicos deste departamento.

Ao técnico da Central de Análises Químicas Instrumentais do IQSC/USP, Dr. Márcio de Paula, não só pelo apoio prestado na obtenção e análise das micrografias por MEV, mas também pela amizade e paciência durante as muitas horas de ensaio.

À UFSCAR/DEMA, através do professor Márcio Raymundo Morelli, pela viabilização do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Ao Laboratório de Estruturas da EESC com sua equipe, Luiz Varela, Amaury e toda a turma.

Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil, na pessoa do engenheiro Flávio Moreira Salles, que colocou à disposição instalações e apoio técnico necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

Às empresas Holcim Cimentos, BASF Chemical Company, RheoSet, Grace Construction Products, Mineração Jundu e Elkem do Brasil pela doação de materiais para os experimentos.

À CAPES e ao CNPq por acreditarem na importância desta pesquisa e pelas bolsas de estudo concedidas.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.





**Que a nossa breve viagem seja uma grande oportunidade de aprender e ensinar,  
entender e atender aqueles que viajam ao nosso lado,  
porque não foi o acaso que os colocou ali.**

Trecho retirado da Redação Momento Espírita,  
com base em texto de autoria de Silvana Duboc.



## RESUMO

---

TRIGO, A. P. M. **Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais**. 2012. 295 p. Tese de Doutorado – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2012.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a técnica de dopagem em agregados química e mineralogicamente deficientes e tem como objetivo demonstrar que se houver a dopagem de agregados, ainda que haja o limitante das respectivas resistências destes materiais, eles poderão vir a ser utilizados em grandes obras com pleno êxito. A técnica apresenta-se como uma solução para a problemática de disponibilidade de bens minerais, atualmente em declínio em virtude de problemas de sustentabilidade ambiental, de zoneamentos restritivos e de usos competitivos do solo, tornando preocupantes as perspectivas de garantia de suprimento futuro. Por meio da impregnação inicial do agregado com aglomerantes de alto desempenho foi possível modificar sua textura, estabelecer ponte de ligação entre ele e a matriz do concreto e criar carapaça de proteção e reforço, atingindo-se  $f_{c28} = 60$  MPa nos concretos lateríticos dopados. A eficiência da técnica foi avaliada comparando-se propriedades mecânicas e microestruturais de concretos não dopados (referência) e dopados. Para tanto, foram realizados ensaios de resistências à compressão, à tração por compressão diametral e à tração na flexão, absorção de água por imersão e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados demonstraram ser possível melhorar agregados graúdos deficientes por meio da dopagem e obter concretos de comportamento comparável ou até superior a concretos usualmente considerados como de bom desempenho. Ainda que seja um estudo inicial, a técnica de dopagem revela-se promissora, com expectativa de uso em agregados normalmente considerados inadequados para concretos estruturais.

Palavras-chave: Agregados alternativos. Técnica de dopagem. Concreto estrutural. Ensaio mecânico. Ensaio microestruturais.



## ABSTRACT

---

TRIGO, A. P. M. **Study of aggregates doping applied to structural concretes.** 2012. 295 p. Ph.D. Thesis – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2012.

This thesis presents a study on the doping technique in aggregates disabled chemical and mineralogical and aims to demonstrate that with the technique, although there is a resistances limitation, these aggregates could be used with success in large projects. The doping technique is presented as a solution to the minerals availability problem, currently declining due to environmental sustainability problems, restrictive zoning and land competing uses, fact that worries the future supply security. By impregnating initial of the aggregate with high performance binders was possible to modify its texture, to establish a bridge between it and the concrete matrix and create shell protection and enhancement, reaching  $f_{c28} = 60$  MPa in lateritic doped concrete. Mechanical and microstructural properties of reference concretes and doped concretes were compared to evaluate the doping efficiency. Testing of compressive strength, tensile strength by diametrical compression and tensile strength in bending, water absorption by immersion and scanning electron microscopy were performed. The results indicate that deficient coarse aggregates can be improved by the doping technique and it is possible to obtain specific behavior comparable or even superior to concrete usually considered to be of good performance. Although it is an initial study, the doping technique seems to be promising, with expected use in aggregates considered unsuitable for structural concrete.

Keywords: Alternative aggregates. Doping technique. Structural concrete. Mechanical tests. Microstructural tests.



## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1: Modificação da zona de transição na interface pasta/agregado e alteração da conformação superficial, através da dopagem de agregado. ....	11
Figura 2: Dopagem de agregados para aumentar a aderência a propiciar e seu reforço. ....	12
Figura 3: Esquema de ensaios para determinação da resistência de aderência entre o cimento e o agregado.....	14
Figura 4: Idealização do funcionamento de um agregado sob carregamento. Deficiência da zona de transição (à esquerda) e melhoria dessa região pela adição de sílica ativa advinda da dopagem (à direita).....	16
Figura 5: Concreto convencional: ligação frágil entre os agregados e a argamassa. ....	18
Figura 6: Caminhos preferenciais de penetração de agentes agressivos: casos de concretos com alta relação água/cimento e baixa compacidade.....	19
Figura 7: Ilustração do efeito “parede”.....	20
Figura 8: Atuação da sílica ativa na interface pasta/agregado.....	22
Figura 9: Micrografias retratando as zonas de transição em diferentes concretos, com e sem sílica ativa.....	24
Figura 10: Diferenças da forma de ruptura em concreto sem e com sílica ativa.....	25
Figura 11: Jazida de granito – Ceará. ....	28
Figura 12: Preço médio da tonelada de pedra britada nº 02 por região – Jan-Jul/2009.....	32
Figura 13: Amostras de lateritas em microscópio ótico (aumento de 50 vezes). ....	33
Figura 14: Mapa mundial mostrando as regiões de ocorrência de solos lateríticos. ....	34
Figura 15: Ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro.....	35
Figura 16: Influência do tipo de cimento na resistência.....	40
Figura 17: Representação esquemática da hidratação do cimento Portland comum, baseada na taxa de liberação de calor. ....	42
Figura 18: Formação do C-S-H em pastas com sílica: (a) tipos I e II e (b) tipo III. ....	47
Figura 19: Resultado de porosidade obtido por intrusão de mercúrio para pastas de cimento CPV ARI, com (PS) e sem (PN) sílica ativa, aos 3 e 28 dias de idade e relação a/agl = 0,5...48	48
Figura 20: Variação do grau de hidratação do cimento necessário para atingir a desconexão dos poros em função da relação a/c e do teor de sílica ativa. ....	49
Figura 21: Variação do grau de hidratação do cimento necessário para atingir a desconexão dos poros em função do teor de sílica ativa para várias relações a/c.....	50
Figura 22: Difratoograma para amostra com 50% de CH e 50% de sílica de Fe-Si. ....	52
Figura 23: Difratoograma para amostra com 50% de CH e 100% de sílica de Fe-Si. ....	53

Figura 24: Cimento flocculado (esq.) e cimento deflocculado (dir.).	57
Figura 25: Curvas do tempo de escoamento <i>versus</i> tempo para pastas de cimento produzidas com CPV ARI em função da seqüência de mistura adotada.	62
Figura 26: Característica porosa da laterita, utilizando MEV.	68
Figura 27: Modelo de empacotamento segundo Oliveira e colaboradores (2000).	70
Figura 28: Dopagem de agregados para aumentar a aderência e propiciar seu reforço.	72
Figura 29: Lateritas empregadas no estudo.	77
Figura 30: Localização das lateritas empregadas no estudo.	78
Figura 31: Depósito de lateritas no local de coleta.	79
Figura 32: Depósito de lateritas – destaque para a espessura da camada.	79
Figura 33: Presença de grandes torrões de laterita no local de coleta.	80
Figura 34: Outros depósitos de laterita na região.	81
Figura 35: Depósitos contendo partículas de laterita com dimensões variadas.	82
Figura 36: Seixos rolados empregados no estudo.	82
Figura 37: Ensaio de miniabatimento: espalhamento da pasta.	86
Figura 38: Ensaio de tempo de pega realizado nas caldas de impregnação.	87
Figura 39: Calda de alto desempenho preparada em misturador mecânico.	91
Figura 40: Disco giratório usado no preparo da solução de água e sílica ativa.	92
Figura 41: Etapas da dopagem com calda de alto desempenho, exemplificadas para a laterita (linha superior) e para o seixo rolado (linha inferior): (a) lançamento dos agregados na calda; (b) homogeneização da mistura; (c) remoção do excesso da calda.	94
Figura 42: Agregados dopados com calda de alto desempenho e cobertos com saco plástico: laterita (à esquerda) e seixo rolado (à direita).	94
Figura 43: Etapas da dopagem com solução de água e sílica ativa, exclusivas da laterita: (a) lançamento dos agregados na solução; (b) agregados imersos; (c) remoção do excesso da solução; (d) secagem ao ar para obtenção da condição saturada superfície seca.	97
Figura 44: Etapas conjuntas dos procedimentos de mistura dos materiais da calda de alto desempenho e dopagem dos agregados graúdos.	98
Figura 45: Seixo com impregnação em início de pega (à esquerda) e após 24 horas de impregnação (à direita).	102
Figura 46: Vista da sala de preparação de amostras do LMABC.	104
Figura 47: Etapas de preparação das amostras de concreto.	105
Figura 48: Etapas finais de preparação das amostras polidas.	106
Figura 49: Armazenamento das amostras.	106
Figura 50: Colagem com tinta prata e recobrimento com ouro.	107
Figura 51: Microscópio eletrônico de varredura utilizado no estudo.	110
Figura 52: Microscópio digital utilizado no estudo.	110

Figura 53: Forma, textura superficial e coloração da laterita (à esq.) e do seixo rolado (à dir.). .....	113
Figura 54: Massa unitária compactada e índice de vazios em ensaios de empacotamento de Areia 1 e agregados graúdos.....	115
Figura 55: Índice de vazios em ensaios de empacotamento dos agregados miúdos. ....	116
Figura 56: Curva “área de espalhamento <i>versus</i> teor de aditivo” para caldas confeccionadas com CPIII 40 RS. ....	118
Figura 57: Curva “área de espalhamento <i>versus</i> teor de aditivo” para caldas confeccionadas com CPV ARI.....	118
Figura 58: Comparação do efeito do aditivo superplastificante nos tempos de pega das caldas de alto desempenho confeccionadas com CPV ARI. ....	120
Figura 59: Etapas da confecção da calda de alto desempenho: (a) cimento e água homogeneizados; (b) lançamento da sílica ativa; (c) lançamento do aditivo; (d) mistura final. .....	124
Figura 60: Fluidez da calda de alto desempenho após lançamento atrasado do aditivo superplastificante. ....	124
Figura 61: Etapas da confecção da solução de água e sílica ativa.....	125
Figura 62: Determinação da absorção de água da laterita em função do tempo. ....	126
Figura 63: Textura superficial do seixo rolado (linha superior) e da laterita (linha inferior) antes e após impregnação com calda.....	128
Figura 64: Volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros da amostra de laterita sem dopagem. ....	129
Figura 65: Etapas principais da confecção dos concretos controles com laterita (linha superior) e com seixo rolado (linha inferior): agregado graúdo, aglomerantes e água homogeneizados (à esq.) e mistura final (à dir.).....	136
Figura 66: Etapas da confecção dos concretos dopados elaborados com laterita (linha superior) e com seixo rolado (linha inferior): aglomerantes, agregados miúdos e água homogeneizados (à esq.), lançamento do agregado dopado (centro) e mistura final (à dir.).	137
Figura 67: Diferença na coloração dos concretos lateríticos controle (coloração avermelhada) e dopado (coloração esverdeada).....	138
Figura 68: Destaque das zonas de transição pasta/agregado estudadas.....	139
Figura 69: Resistência à compressão, aos 28 dias de idade, dos concretos com laterita.....	140
Figura 70: Evolução da resistência à compressão com a idade dos concretos lateríticos. ....	144
Figura 71: Evolução da resistência à compressão com a idade dos concretos com seixo rolado. .....	144
Figura 72: Absorção de água por imersão com tempo de secagem de 72 horas a 105 °C. ....	151
Figura 73: Índice de vazios por imersão com tempo de secagem de 72 horas a 105 °C.....	152
Figura 74: Amostra polida de laterita dopada com calda e inserida em pasta de cimento (à esq.) e seu respectivo aumento de 24x (à dir.).....	154

Figura 75: Interior poroso da laterita: ausência de calda de impregnação (à esq. 24x e à dir. 1000x).....	155
Figura 76: Comparação de partículas de laterita sem (linha superior) e com (linha inferior) impregnação de solução de água e sílica ativa. ....	156
Figura 77: Partícula de laterita dopada com solução de água e sílica, observada em MEV. .	157
Figura 78: Amostras de concreto laterítico LC, LDC e LDS selecionadas para MEV. ....	157
Figura 79: Amostras de concreto laterítico complementar LC-Comp1 (à esq.) e LD-Comp1 (à dir.) selecionadas para MEV. ....	158
Figura 80: Amostras de concreto laterítico complementar LC-Comp2 (à esq.) e LD-Comp2 (à dir.) selecionadas para MEV. ....	158
Figura 81: Amostras de concreto laterítico complementar LC-Comp3 (à esq.) e LD-Comp3 (à dir.) selecionadas para MEV. ....	159
Figura 82: Micrografias (37x até 500x) da amostra polida de laterita dopada com calda. ....	160
Figura 83: Micrografia (500x) detalhando a calda de impregnação no interior da laterita. ....	161
Figura 84: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC. ....	163
Figura 85: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LDC. ....	164
Figura 86: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LDS.....	165
Figura 87: Micrografias (200x) das amostras de LDC (esq.) e LDS (dir.) evidenciando poros. ....	167
Figura 88: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC-Comp1. ....	168
Figura 89: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LD-Comp1.....	169
Figura 90: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC-Comp2. ....	170
Figura 91: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LD-Comp2.....	171
Figura 92: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC-Comp3.....	172
Figura 93: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LD-Comp3.....	173
Figura 94: Micrografias (500x) das amostras de LD-Comp1 (esq.) e LC (dir.) evidenciando partículas anidras de cimento. ....	174
Figura 95: Estudo semi-quantitativo das fases presentes nos traços lateríticos LC, LDC e LDS. ....	177
Figura 96: Estudo semi-quantitativo das fases presentes nos traços lateríticos complementares. ....	178
Figura 97: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC.....	181
Figura 98: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.....	182
Figura 99: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LDC.....	182
Figura 100: Micrografias (1000x e 5000x) para amostra fraturada de LDC, evidenciando a região da pasta do concreto. ....	183

Figura 101: Micrografias (5000x até 40000x) para amostra fraturada de LDC, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	183
Figura 102: Micrografias (100x até 2000x) para amostra fraturada de LDS. ....	184
Figura 103: Micrografias (2000x até 10000x) para amostra fraturada de LDS, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	184
Figura 104: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC-Comp1. ....	186
Figura 105: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC-Comp1, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	186
Figura 106: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LD-Comp1. ....	187
Figura 107: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LD-Comp1, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	187
Figura 108: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC-Comp2. ....	188
Figura 109: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC-Comp2, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	189
Figura 110: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LD-Comp2. ....	189
Figura 111: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LD-Comp2, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	190
Figura 112: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC-Comp3. ....	191
Figura 113: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC-Comp3, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	191
Figura 114: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LD-Comp3. ....	192
Figura 115: Micrografias (5000x até 20000x) para amostra fraturada de LD-Comp3, evidenciando a região onde a laterita foi retirada. ....	192
Figura 116: Amostras de concreto 1:7,5 com seixo rolado selecionadas para MEV. ....	194
Figura 117: Imagens das amostras polidas da Figura 69 ampliadas 24x. ....	194
Figura 118: Amostras de concreto 1:5,5 com seixo rolado selecionadas para MEV. ....	195
Figura 119: Imagens das amostras polidas da Figura 118 ampliadas 24x. ....	195
Figura 120: Amostras de concreto 1:3,5 com seixo rolado selecionadas para MEV. ....	196
Figura 121: Imagens das amostras polidas da Figura 120 ampliadas 24x. ....	196
Figura 122: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SC-75. ....	197
Figura 123: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-75-IP. ....	198
Figura 124: Micrografias (100x) para amostras de SC-75 (esq.) e traço SD-75-IP (dir.). ....	199
Figura 125: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-75-FP. ....	200
Figura 126: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-75-FP. ....	202
Figura 127: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SC-55. ....	204
Figura 128: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-55. ....	205
Figura 129: Micrografias (100x até 3000x) para amostra polida de SC-35. ....	206

Figura 130: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-35.....	207
Figura 131: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-35.....	208
Figura 132: Micrografia (500x) de amostra polida de SD-35, destacando a porosidade. ....	210
Figura 133: Estudo semi-quantitativo das fases presentes nos traços 1:7,5.....	211
Figura 134: Estudo semi-quantitativo fases presentes nos traços 1:5,5 e 1:3,5.....	212
Figura 135: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SC-75.....	214
Figura 136: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de SC-75, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado. ....	215
Figura 137: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SD-75-IP.....	216
Figura 138: Micrografias (1000x e 5000x) para amostra fraturada de SD-75-IP, evidenciando os produtos de hidratação na ZT. ....	216
Figura 139: Micrografias (30x até 5000x) para amostra fraturada de SD-75-IP, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado. ....	217
Figura 140: Permanência da camada de impregnação no agregado.....	218
Figura 141: Micrografias (10x até 5000x) para amostra fraturada de SD-75-FP.....	218
Figura 142: Micrografia (10000x) para amostra fraturada de SD-75-FP, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado. ....	219
Figura 143: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SC-55.....	219
Figura 144: Ampliação (10000x) das Micrografias (c) e (d) da Figura 143. ....	220
Figura 145: Micrografias (30x até 500x) para amostra fraturada de SD-55. ....	220
Figura 146: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SD-55, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado. ....	221
Figura 147: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de SD-55: detalhe da região onde o seixo rolado foi retirado. ....	222
Figura 148: Micrografias (100x e 500x) para amostra fraturada de SC-35.....	223
Figura 149: Micrografias (1000x até 10000x) para amostra fraturada de SC-35, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado. ....	224
Figura 150: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SD-35. ....	225
Figura 151: Micrografias (5000x e 10000x) para amostra fraturada de SD-35, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado. ....	226
Figura 152: Micrografias (5000x) da ZT agregado/pasta do concreto (à esq.) e da ZT calda de dopagem/pasta do concreto (a dir.).....	227
Figura 153: Curva granulométrica do fíler SM500, obtida em ensaio de sedimentação.....	252
Figura 154: Curva de dosagem para os concretos de referência confeccionados com laterita. ....	260
Figura 155: Curva de dosagem para os concretos dopados confeccionados com laterita.....	260
Figura 156: Curva de dosagem para os concretos de referência confeccionados com seixo rolado. ....	261

Figura 157: Curva de dosagem para os concretos dopados confeccionados com seixo rolado. .....	261
--	-----



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índice de orientação máximo ( $I_{CHmáx}$ ) dos cristais de CH e espessura da zona de transição ( $\delta$ ), na interface granito – pasta com relação água/(cimento+sílica ativa) = 0,30. ...	23
Tabela 2: Propriedades dos quatro principais componentes do cimento.....	39
Tabela 3: Variação do procedimento de mistura e os correspondentes tempos de escoamento. ....	61
Tabela 4: Textura superficial dos agregados, com exemplos.....	65
Tabela 5: Característica mecânica de alguns tipos de rochas.....	67
Tabela 6: Concretos elaborados com empacotamento de agregados e baixo consumo de cimento. ....	74
Tabela 7: Características reológicas do concreto autoadensável.....	74
Tabela 8: Discriminação das fases presentes na pasta de cimento hidratada pelos tons cinza. ....	109
Tabela 9: Resultados dos tempos de pega das caldas de alto desempenho confeccionadas com CPV ARI. ....	120
Tabela 10: Consumos de materiais da calda de alto desempenho.....	123
Tabela 11: Resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras lateríticas com e sem camada de dopagem.....	128
Tabela 12: Consumos de materiais por $m^3$ de concreto dos traços estudados com laterita ( $kg/m^3$ ) e alguns parâmetros e propriedades considerados.....	132
Tabela 13: Consumos de materiais por $m^3$ de concreto dos traços estudados com seixo rolado ( $kg/m^3$ ) e alguns parâmetros e propriedades considerados.....	133
Tabela 14: Propriedades dos traços de concreto laterítico dopado no estado fresco.....	135
Tabela 15: Propriedades dos traços de concreto com seixo dopado no estado fresco.....	135
Tabela 16: Exemplos de estudos desenvolvidos pelo grupo LMABC, cujos concretos possuem matrizes semelhantes à matriz utilizada neste estudo.....	143
Tabela 17: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico complementar. ....	146
Tabela 18: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico. ....	146
Tabela 19: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.....	147
Tabela 20: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos concretos lateríticos estudados.....	148
Tabela 21: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos concretos com seixo rolado estudados. ....	148
Tabela 22: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto laterítico. ....	149

Tabela 23: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado. ....	149
Tabela 24: Relação entre Absorção de água e Índice de vazios com a qualidade do concreto. ....	151
Tabela 25: Composição química dos pontos A, B e C localizados no interior da laterita (Figura 84 e Figura 86). ....	166
Tabela 26: Propriedades físicas dos cimentos Portland utilizados. ....	249
Tabela 27: Caracterização física dos agregados miúdos. ....	251
Tabela 28: Caracterização física dos agregados graúdos ....	252
Tabela 29: Características dos aditivos avaliados ....	254
Tabela 30: Resistência à compressão, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico complementar. ....	255
Tabela 31: Resistência à compressão, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico. ....	255
Tabela 32: Resistência à compressão, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado. ....	256
Tabela 33: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico complementar. ....	256
Tabela 34: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico. ....	257
Tabela 35: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado. ....	257
Tabela 36: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico. ....	258
Tabela 37: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado. ....	258
Tabela 38: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto laterítico. ....	259
Tabela 39: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado. ....	259

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	-	Área de Preservação Permanente
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i> (EUA)
AFt	-	Etringita
AFm	-	Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
Al	-	Alumínio (elemento químico)
Al(OH)	-	Hidróxido de alumínio
Au	-	Ouro (elemento químico)
BGTC	-	Brita Graduada Tratada com Cimento
C	-	Consumo de material
CaO	-	Óxido de Cálcio
C <sub>2</sub> S	-	Silicato dicálcico ou belita
C <sub>3</sub> A	-	Aluminato tricálcico ou aluminato
C <sub>3</sub> S	-	Silicato tricálcico ou alita
C <sub>4</sub> AF	-	Ferroaluminato tetracálcico ou ferrita
CAD	-	Concreto de alto desempenho
CEB	-	<i>Comité Européen de Normalisation</i> (Europa)
CH	-	Hidróxido de cálcio ou portlandita
CP	-	Cimento Portland
CP III-RS	-	Cimento Portland de alto-forno Resistente a Sulfatos
CPV ARI	-	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	-	Silicato de cálcio hidratado
DNPM	-	Departamento Nacional de Produção Mineral
EDS	-	Espectroscopia por Dispersão de Energia
EESC	-	Escola de Engenharia de São Carlos
Fe	-	Ferro (elemento químico)
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRACON	-	Instituto Brasileiro do Concreto
INCC-M	-	Índice Nacional de Custos da Construção – Mercado
I.V.	-	Índice de Vazios
LMABC	-	Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg	-	Magnésio (elemento químico)
MUC	-	Massa unitária compactada
Na <sub>2</sub> O	-	Óxido de sódio
Nb	-	Nióbio (elemento químico)

NBR	- Norma Brasileira Registrada
NM	- <i>Norma Mercosur</i>
PIB	- Produto Interno Bruto
RAA	- Reação álcalis-agregado
RILEM	- <i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>
RS	- Resistente a sulfatos
SET	- Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC
SFS	- Sílica de ferro-silício
SIDRA	- Sistema IBGE de Recuperação Automática
SINAPI	- Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SiO <sub>2</sub>	- Dióxido de silício (sílica amorfa)
SP	- Aditivo superplastificante
SS	- (condição) saturada superfície seca
Ti	- Titânio (elemento químico)
USP	- Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

---

$a/agl$	-	Relação água/aglomerante
$a/c$	-	Relação água/cimento
$f_c$	-	Resistência à compressão
$f_{t,d}$	-	Resistência à tração na compressão diametral
$T_{máx}$	-	Temperatura máxima



## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xvii
SUMÁRIO.....	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Justificativa e importância do estudo.....	3
1.3. Ineditismo .....	4
1.4. Objetivo .....	5
1.5. Metodologia.....	5
1.6. Estrutura do estudo .....	6
2. DOPAGEM DE AGREGADOS .....	8
2.1. Definição e mecanismo de dopagem .....	9
2.2. A dopagem e a melhoria da zona de transição .....	19
2.3. Agregados potencialmente utilizáveis .....	26
3. CONCRETO ESTRUTURAL.....	38
3.1. Pasta de aglomerantes.....	38
3.1.1. Cimento Portland.....	38
3.1.2. Adições minerais .....	44
3.1.3. Aditivo superplastificante.....	56
3.2. Agregados.....	62
3.2.1. Características dos agregados.....	62
3.2.2. Empacotamento dos agregados .....	69
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	75
4.1. Caracterização do material .....	75
4.1.1. Cimentos.....	75
4.1.2. Agregados.....	76
4.1.3. Adição mineral .....	83

4.1.4. Aditivo.....	83
4.2. Ensaio preliminares.....	83
4.2.1. Empacotamento dos agregados .....	84
4.2.2. Avaliação dos aditivos.....	85
4.3. Dopagem dos agregados.....	87
4.3.1. Formas de dopagem.....	88
4.3.2. Composições dos traços .....	89
4.3.3. Procedimentos de mistura.....	90
4.4. Dosagem dos concretos .....	99
4.4.1. Traços de concreto controle.....	100
4.4.2. Traços de concreto dopado .....	101
4.4.3. Procedimentos de mistura.....	102
4.5. Preparação de amostras microestruturais .....	103
4.6. Avaliação das propriedades mecânicas .....	107
4.7. Avaliação das propriedades microestruturais .....	108
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	112
5.1. Caracterização do material .....	112
5.1.1. Cimentos.....	112
5.1.2. Agregados.....	113
5.2. Ensaio preliminares.....	114
5.2.1. Empacotamento dos agregados .....	114
5.2.2. Avaliação dos aditivos.....	117
5.3. Dopagem dos agregados.....	121
5.3.1. Composições dos traços .....	122
5.3.2. Procedimentos de mistura.....	123
5.4. Dosagem dos concretos .....	130
5.4.1. Convenção de nomenclatura.....	130
5.4.2. Traços de concreto controle.....	131
5.4.3. Traços de concreto dopado .....	134
5.4.4. Procedimentos de mistura.....	136
5.5. Preparação das amostras microestruturais.....	138
5.6. Avaliação das propriedades mecânicas .....	139
5.6.1. Resistência à compressão .....	139
5.6.2. Resistência à tração por compressão diametral .....	146

5.6.3. Resistência à tração na flexão.....	148
5.6.4. Módulo de elasticidade.....	148
5.6.5. Absorção de água por imersão.....	150
5.7. Avaliação das propriedades microestruturais.....	153
5.7.1. Resultados microestruturais dos concretos lateríticos.....	154
5.7.2. Resultados microestruturais do seixo rolado.....	193
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	228
6.1. Sugestões para prosseguimento da pesquisa.....	234
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	236
APÊNDICES.....	248
Apêndice A – Caracterização do material.....	248
A.1. Cimento.....	248
A.2. Agregado.....	250
A.3. Adição Mineral.....	253
A.4. Aditivo.....	253
Apêndice B – Resultados mecânicos detalhados.....	255
Apêndice C – Diagramas de dosagem dos concretos estudados.....	260



---

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1. Considerações gerais

O setor de construção civil é de grande importância estratégica para qualquer país, principalmente para os em desenvolvimento. Entretanto, observa-se que esse setor provoca significativos impactos ambientais, sendo um grande consumidor de recursos naturais.

No Brasil o segmento econômico da construção civil é responsável por 14,8% do PIB (IBGE, 2010), representando um importante setor da economia do país. Entretanto, a indústria da construção civil é responsável por até 50% do consumo dos recursos naturais pela sociedade em todo planeta (SILVA FILHO e colaboradores, 2002). Só de areia e outros agregados para a produção dos concretos em todo o mundo consomem-se à razão estimada de 16 a 17 bilhões de toneladas por ano (DNPM, 2011). A exploração, processamento e transporte dessas enormes quantidades de matéria prima para produção de cimento e agregados consomem muita energia e afetam desfavoravelmente o meio ambiente (MEHTA, 2001). A explicação para o elevado consumo de agregados está no seu processo de mineração para a construção civil, a qual gera grandes volumes de produção, apresenta beneficiamento simples e baixo preço unitário.

Durante os dois últimos séculos da Revolução Industrial, a ênfase foi posta na produtividade do trabalho, através da otimização do tempo de produção, pois o estoque global de reservas naturais era abundante e o meio ambiente era sadio. Agora a mão-de-obra é que é abundante, enquanto os recursos naturais renováveis e o meio ambiente exigem atenção, a ênfase na produtividade do trabalho deve ser substituída pela ênfase na produtividade dos recursos naturais (MEHTA, 2001). A produtividade dos recursos naturais pressupõe a minimização do uso das matérias primas e a maximização da durabilidade do produto, e redução dos custos de manutenção e reparo.

Em sentido contrário, está a pouca durabilidade das estruturas de concreto, acompanhada de sérias consequências ambientais, pelo aumento no consumo de matérias primas e energia para manutenção, reparo e renovação das estruturas, que geralmente são projetadas para vida útil de 50 anos, mas a realidade demonstra que, nos ambientes das grandes cidades e da costa litorânea, muitas começam a deteriorar com menos de 20 anos de existência (HELENE; PEREIRA, 2005).

Aumentar a vida útil das estruturas de concreto seria uma solução para preservação dos recursos naturais, porém de longo prazo e onerosa. Para reduzir o impacto ambiental, o foco da indústria do concreto deve estar na conservação das matérias primas e energia na produção, buscando-se soluções alternativas para uso e exploração destes recursos. E com a conservação dos recursos naturais, especificamente dos agregados naturais, que este estudo visa contribuir.

Atualmente o setor mineral discute o problema da disponibilidade dos recursos naturais, principalmente daqueles localizados dentro ou no entorno dos aglomerados urbanos. Mesmo por que, os agregados para a construção civil necessitam ser produzidos no entorno do local de consumo, geralmente em áreas urbanas, devido à alta participação do transporte no custo final, que responde por cerca de 1/3 do custo final da areia, e 2/3 do preço final da brita (FRAZÃO, 2010), o que impõe a necessidade de ser produzido o mais próximo possível do mercado consumidor.

A explicação para a preocupação com a disponibilidade dos bens minerais está no declínio da possibilidade de exploração destes, em virtude do inadequado planejamento urbano e territorial, de problemas de sustentabilidade ambiental, de zoneamentos restritivos e de usos competitivos do solo, tornando preocupantes as perspectivas de garantia de suprimento futuro.

O uso de agregados outrora considerados desconhecidos aos concretos, a exemplo do laterítico, pode ser uma solução eficiente, e por que não a principal, para tal problemática. Para isso, é necessário avaliar as características de tais materiais, e se preciso ajustá-las, de modo que suas possíveis deficiências não interfiram no comportamento do concreto.

Sugere-se, neste estudo, que o tratamento de agregados desconhecidos seja realizado a partir da técnica de dopagem, que consiste em estabelecer sua impregnação inicial com materiais que venham reagir com outros aglomerantes, modificando a textura do material ou estabelecendo uma ponte de ligação entre ele e os aglomerantes que venham a ser utilizados. A técnica permite também que se faça um bom prognóstico para o uso de agregados em nova conformação superficial, alterando-se seu comportamento a ponto de torná-lo quase ideal para concretos.

## 1.2. Justificativa e importância do estudo

Rochas para britagem são encontradas na natureza e são consideradas recursos minerais abundantes. Entretanto, essa relativa abundância deve ser encarada com o devido cuidado. Por serem produtos de baixo valor unitário, o custo do transporte encarece o preço para o consumidor final.

Idealmente, portanto, os pontos de produção devem ficar o mais próximo possível dos pontos de consumo, o que torna antieconômica boa parte das fontes de recursos minerais para areia e rocha disponíveis na natureza, pelo alto custo da mineração. Assim, nem sempre as condições ideais são encontradas. Há regiões onde os recursos disponíveis estão distantes. Por exemplo, na região de Manaus/AM, rochas para brita não são encontradas, sendo então utilizado o seixo rolado (FRAZÃO, 2010). Na Bacia do Paraná, como é geologicamente conhecida boa parte da região Sul e Sudeste do país, afloramentos de rocha para britagem são difíceis de serem encontrados, criando-se a necessidade de transportar a brita por distâncias superiores a 100 km (FRAZÃO, 2010).

Muitas vezes, mesmo havendo recurso mineral disponível, este não pode ser extraído devido a restrições à sua exploração. Caso típico de restrição encontra-se na cidade do Rio de Janeiro, onde acima da cota 100 metros é proibida a extração de rocha, restringindo tanto o nível de produção quanto à vida útil das pedreiras em operação, além de inviabilizar a abertura de novas pedreiras (FRAZÃO, 2010). Áreas de proteção ambiental, como o caso do Rio de Janeiro, existem em todo país, criando restrições ao uso dos recursos minerais existentes.

Mesmo que não haja zoneamento municipal restritivo à mineração, a própria expansão urbana torna o acesso a esses recursos minerais inviável. A ocupação desordenada de várzeas e morros nos grandes centros urbanos expulsa os portos de areia e as pedreiras, seja pela ação política dos habitantes, seja pelo encarecimento da propriedade. Na Região Metropolitana de São Paulo, recursos importantes de areia foram esterilizados por loteamentos residenciais e industriais legais e clandestinos, fazendo com que esta região importe mais da metade de suas necessidades de areia de locais a mais de 150 km de distância (FRAZÃO, 2010).

A vista destas considerações, é preciso buscar novas soluções para o aproveitamento de agregados que, em muitos casos, apresentam algum tipo de deficiência, seja ela física ou mineralógica, bem como aqueles localizados em áreas onde os agregados convencionais e tidos como adequados para a confecção de concretos de cimento Portland

não existam e o custo de transporte seja inviável. Propiciando a dopagem de um agregado, através de sua “armação” com uma matriz de alta qualidade, estende-se a possibilidade de utilização de agregados outrora considerados desconhecidos aos concretos.

Ainda que se busque solução para diversos problemas em grandes obras em que haja algum tipo de reação álcalis-agregados, não é essa a pretensão desse estudo, que é um trabalho inicial. Por outro lado, não se pode considerar que o custo da dopagem seja elevado num determinado instante, tendo em vista, por exemplo, os grandes custos de manutenção ou correção de obras que passaram ou passam pela problemática, ou problema.

O presente estudo dará suporte técnico e científico aos projetistas e àqueles que processam materiais, com a responsabilidade de entregá-los dentro das características almejadas e previstas nos projetos.

### **1.3. Ineditismo**

A técnica da dopagem de materiais, ainda que não seja uma exclusividade da área na qual está inserida este estudo, é inédita no meio, sendo inclusive um termo que foi introduzido em trabalhos científicos anteriores (SILVA, LIBORIO, 2005; LIBORIO e colaboradores, 2003; LIBORIO, FAGURY, 2002; SILVA, LIBORIO, 2002; LIBORIO e colaboradores, 1998), com sucesso, por Liborio (1998). Outro aspecto de relevância deste estudo é que se tem encontrado poucos trabalhos no sentido de dopar agregados de baixa qualidade, ou mesmo aqueles já consagrados, com o intuito de melhorar seu desempenho em concretos estruturais, sendo que os trabalhos já apresentados em eventos anteriores foram desenvolvidos por pesquisadores do próprio LMABC/EESC/USP.

A técnica, tratada cientificamente, é emergente e deverá solucionar diversos mitos referentes ao uso de outros tipos de agregados, nunca relacionados como adequados aos concretos estruturais. Um aspecto que contribui para a não utilização de outros tipos de agregados associa-se à abundância daqueles outrora disponibilizados em grande quantidade em diversos pontos onde emergiram grandes centros urbanos ou onde se fizeram necessárias obras de grande porte.

## 1.4. Objetivo

O objetivo do estudo é demonstrar que se houver a dopagem de agregados graúdos, ainda que estes apresentem deficiências mineralógicas ou físicas e haja o limitante das respectivas resistências desses materiais, eles poderão vir a ser utilizados em grandes obras com pleno êxito, constituindo concretos estruturais.

Como objetivo específico cita-se a comprovação da eficiência da dopagem a partir das seguintes análises:

- desempenho mecânico de concretos produzidos com os agregados dopados em relação a outros de referência;
- microestrutura da região de interface na transição entre a pasta do concreto e o agregado dopado;
- microestrutura da carapaça envolvente dos agregados dopados,

## 1.5. Metodologia

O estudo se desenvolve a partir de uma revisão bibliográfica sobre aspectos da técnica de dopagem de materiais, principalmente de agregados graúdos, e sobre aspectos das fases constituintes dos concretos estruturais, enfatizando a fase da zona de transição pasta/agregado. A seguir um programa experimental visa atingir o objetivo citado nesta introdução.

O programa experimental apresenta inicialmente a caracterização dos materiais empregados e na seqüência as etapas seguidas para a dopagem dos agregados avaliados e para a confecção dos concretos dopados e dos concretos de referência.

Os ensaios empregados na caracterização mecânica dos concretos compreendem a determinação da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade.

Para avaliar o comportamento da zona de transição na interface pasta/agregado nos concretos elaborados sem e com aplicação da técnica de dopagem foram realizadas análises da microestrutura nestas regiões de interface e também análises da microestrutura na carapaça envolvente dos agregados dopados.

## 1.6. Estrutura do estudo

Este estudo está organizado em seis capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices.

O **Capítulo 1** compreende esta introdução onde se estabeleceu as motivações para o estudo além do objetivo que se pretende alcançar. A metodologia a ser empregada e o aspecto inédito desta pesquisa, são brevemente comentados.

A revisão bibliográfica do **Capítulo 2** aborda a definição do termo dopagem nas áreas médica e eletrônica e, mais recentemente, a aplicação do termo no setor da construção civil, e explica como o mecanismo de dopagem de materiais pode modificar as características dos agregados graúdos usados em concretos. Citam-se características da região de zona de transição na interface pasta/agregado e comportamento dos materiais nesta região, associando-os à aplicação da técnica de dopagem e às conseqüentes alterações esperadas. Por fim discorre-se sobre a situação atual de agregados graúdos no Brasil e no Mundo e a problemática de disponibilidade destes recursos, apresentando como alternativa o potencial de uso de alguns agregados alternativos.

No **Capítulo 3** a revisão bibliográfica trata de concretos estruturais, especificamente quanto às fases constituintes, abordando inicialmente aspectos relevantes da fase pasta de aglomerantes, composta por cimento Portland, adições minerais e aditivo superplastificante. Posteriormente, analisam-se algumas características da fase agregado e a importância da técnica de empacotamento de partículas para o desempenho do concreto.

O **Capítulo 4** apresenta os materiais empregados, com suas principais características. Os procedimentos dividem-se em três etapas, inicialmente os ensaios prévios realizados para estabelecer as dosagens das composições de dopagem e dos concretos avaliados; em seguida a aplicação da técnica de dopagem nos agregados selecionados; e por fim a confecção dos concretos dopados e de referência e suas características no estado fresco. Este capítulo apresenta ainda a avaliação no estado endurecido por meio de ensaios mecânicos e análise de microestrutura. São avaliados a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão, além da zona de transição pasta/agregado utilizando-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura.

No **Capítulo 5** faz-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos. Buscou-se, além de comparar os concretos elaborados com a técnica de dopagem com os concretos de referência, realizar comparações pertinentes encontradas na literatura técnica, de acordo com a revisão bibliográfica realizada.

O **Capítulo 6** conclui com uma síntese dos principais resultados obtidos e apresenta sugestões para aprofundamento e prosseguimento da pesquisa.

Por fim o estudo apresenta ainda as Referências Bibliográficas e alguns Apêndices, onde são apresentados dados mais detalhados da caracterização dos materiais e dos ensaios realizados.

## **2. DOPAGEM DE AGREGADOS**

---

---

Os agregados para a indústria da construção civil são os insumos minerais mais consumidos no mundo (DNPM, 2011). É misturado ao concreto que os maiores volumes de agregados minerais chegam a esse setor. Para se ter uma ideia, o concreto, que o material de construção mais utilizado pelo homem, constitui-se geralmente de 80% de agregados.

No momento, os agregados são bens finitos e matérias primas fundamentais e insubstituíveis na construção civil. Seu custo é composto apenas pelo custo de extração, o de transporte e a margem de lucro do minerador e do transportador.

Por serem materiais bastante consumidos, apresentarem valor relativamente baixo e constituírem recursos minerais dos mais acessíveis à população, a possibilidade de substituição dos agregados minerais, em particular da areia e da brita, por outros materiais naturais ou industrializados é quase nula. Entretanto, com a escassez das reservas minerais, restrições ambientais, leis de zoneamento municipais restritivas e encarecimento do material devido ao elevado custo de transporte para áreas onde não existem agregados convencionais e tidos como adequados para confecção de concretos, surge a necessidade de aproveitamento de agregados alternativos.

Em muitos casos, os agregados que virão a ser utilizados como alternativos apresentam algum tipo de deficiência, seja ela física ou mineralógica, que associada à falta de informações e conhecimento acerca destes materiais, restringem seu uso e aplicação. Neste contexto, propiciando a dopagem de um agregado estende-se sua possibilidade de uso em concretos de cimento Portland.

A seguir será apresentada a definição do termo dopagem e, na seqüência, o efeito da dopagem na microestrutura dos concretos e quais agregados podem ser considerados potencialmente utilizáveis para a aplicação da técnica.

## 2.1. Definição e mecanismo de dopagem

Dopagem é o ato, o efeito ou a realização de introduzir substância(s) estranha(s) num meio ou sistema, não-vivo ou vivo, acidental ou intencional, lícita ou ilícitamente, com propósitos usualmente bem determinados. A palavra se originou do verbo inglês “*to dope*” que significa adicionar substância estranha, acrescida do sufixo “agem” que é o ato ou efeito de<sup>1</sup>.

A palavra dopagem costuma ser utilizada nas áreas médica, eletrônica e, mais recentemente, vem sendo empregada na construção civil, mormente na melhoria da adesividade do betume em agregados, nas pavimentações.

Na área médica a dopagem refere-se à administração e/ou injeção de substância anabolizante, excitante ou estupefaciente<sup>2</sup> num organismo, humano ou não-humano (animal), usualmente com o propósito de obtenção de vantagem competitiva em alguma modalidade desportiva ou outra. Ouve-se falar muito em doping no esporte.

Na verdade, *doping* e dopagem são duas palavras que têm significados diferentes. O *doping* é a própria substância que pode ser usada com fins médicos e a dopagem é o uso em atletas com a finalidade de levar vantagem no desempenho esportivo. Com o passar do tempo, a palavra *doping* foi ganhando força pelo próprio uso e hoje, *doping* e dopagem são praticamente sinônimos.

A utilização de substâncias proibidas no esporte pode tornar o atleta mais forte e mais rápido, fazendo com que os atletas tenham um melhor rendimento físico no desporto, provendo-lhes vantagens competitivas desleais, pois desiguais, em relação aos demais que delas não se utilizam. Isso é considerado uma espécie de trapaça e é proibido em torneios e campeonatos.

Ainda na área médica, pesquisas visando terapias gênicas nacionais e internacionais, incluindo, células-tronco somáticas e embrionárias, prometem uma mudança no paradigma clínico quanto à prevenção, diagnóstico e tratamento de doenças humanas herdadas e adquiridas. Entretanto, tais pesquisas também têm proporcionado ferramentas

---

<sup>1</sup> Fonte: Enciclopédia Livre Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Dopagem>. Acesso em: 14/03/2009.

<sup>2</sup> Que entorpece; que faz perder a atividade (Fonte: Dicionário Online de Português. Disponível em: <http://www.dicio.com.br/estupefaciente/>. Acesso em: 14/03/2009).

para o desenvolvimento do recém denominado doping genético<sup>3</sup> no esporte. (RAMIREZ; RIBEIRO<sup>4</sup>, 2005 apud RAMIREZ, 2007).

Já a dopagem eletrônica, longe de qualquer referência negativa, está por detrás de todo o progresso desta área. Nesse caso, a dopagem consiste no acréscimo de impurezas químicas elementares (usualmente índio ou fósforo) em elemento químico semiconductor puro (ou o germânio ou o silício, notadamente este último, na era atual), com a finalidade de dotá-los de propriedades de condução controlada específica, para aplicação em dispositivos eletrônicos elementares de circuitos. Com o avanço da nanotecnologia os cientistas puderam compreender melhor o funcionamento da dopagem e aplicá-lo aos nanocristais<sup>5</sup>. Esse novo entendimento pode permitir a criação de novas tecnologias de altíssima eficiência, que vão desde células solares de alto rendimento e raios lasers, até futurísticos equipamentos "spintrônicos" e biosensores ultrasensíveis (ERWIN e colaboradores, 2009).

Outros materiais também contemplam os benefícios da dopagem no sentido de dotá-los de características específicas, como é o caso do cimento Portland, em que a substituição de íons nos minerais puros do clínquer, torna-os a alita e belita, por exemplo. Esta substituição, ou introdução de imperfeições é responsável pela reatividade dos compostos (STEPHAN, DIKOUNDOU, RAUDASCHL-SIEBER, 2008; STEPHAN, WISTUBA, 2006; KIRCHHEIM e colaboradores, 2010). Ou ainda o caso das borrachas que também costumam ser dopadas para alterar suas características mecânica e térmica (PREDEEP e colaboradores, 2005).

A área da construção civil contempla os benefícios advindos da dopagem através do uso da técnica de dopagem de materiais. O setor rodoviário, por exemplo, emprega a brita graduada tratada com cimento (BGTC), que é o produto resultante da mistura, em usina, de pedra britada, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos, em proporções determinadas experimentalmente. Após mistura, compactação e cura, a BGTC adquire propriedades físicas específicas para atuar como camada de base ou sub-base de pavimentos.

---

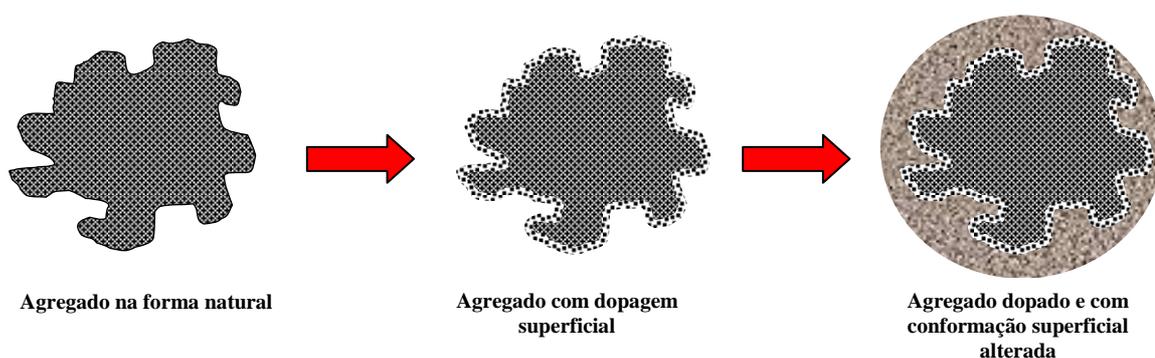
<sup>3</sup> O termo doping genético pode ser definido como a utilização não terapêutica de células, genes, elementos genéticos ou da modulação da expressão gênica, visando o aumento do desempenho esportivo.

<sup>4</sup> RAMIREZ A., RIBEIRO A. Doping genético e esporte. **Revista Metropolitana de Ciências do Movimento Humano**, São Paulo, 5 (2):9-20, 2005.

<sup>5</sup> Os nanocristais são minúsculas partículas de elementos semicondutores, medindo apenas alguns nanômetros de diâmetro. Graças ao seu tamanho minúsculo, eles apresentam propriedades eletrônicas, ópticas e magnéticas que são únicas, diferenciadas daquelas apresentadas pelo mesmo material em grande quantidade. São essas propriedades que permitem o seu uso nas mais avançadas tecnologias da eletrônica (FONTE: ERWIN e colaboradores, 2009).

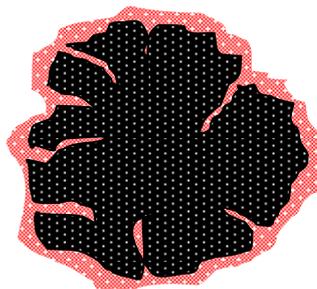
Os benefícios para a construção civil poderão ser oriundos também da técnica de dopagem de materiais, ao aplicá-la em agregados graúdos que venham a ser usados na produção de concretos, sejam eles convencionais ou de alto desempenho. Ainda que não seja uma exclusividade da área na qual está inserida este estudo, a técnica da dopagem de materiais é inédita no meio, e não se tem encontrado trabalhos no sentido de dopar agregados de baixa qualidade, ou mesmo aqueles já consagrados, com o intuito de melhorar seu desempenho em concretos estruturais.

A técnica da dopagem de materiais, abordada neste estudo, consiste em estabelecer sua impregnação inicial com materiais que venham reagir com outros aglomerantes, modificando a textura do material ou estabelecendo uma ponte de ligação entre ele e os aglomerantes que venham a ser utilizados. Na Figura 1 é idealizada essa concepção.



**Figura 1: Modificação da zona de transição na interface pasta/agregado e alteração da conformação superficial, através da dopagem de agregado.**  
Fonte: Liborio e colaboradores (2005).

Outra hipótese relacionada à técnica de dopagem, e também abordada aqui, é a do reforço do próprio agregado, através de sua dopagem interna, dos poros permeáveis, conforme idealização da Figura 2.



Idealização de um agregado frágil, poroso, com dopagem superficial e “armado” com adições especiais.

**Figura 2: Dopagem de agregados para aumentar a aderência a propiciar e seu reforço.**  
**Fonte: Liborio e colaboradores (2005).**

Os materiais a serem escolhidos para a dopagem dependerão das características superficiais do agregado, constituindo-se como materiais potencialmente utilizáveis, as sílicas e/ou outros materiais cimentícios suplementares de características especiais. Se a dopagem superficial for de alto desempenho, existe a hipótese de que ela poderá funcionar como carapaça para isolamento de agregados que venham apresentar possível ocorrência de reações do tipo álcali-agregado.

Liborio e colaboradores (2005) trabalhando com a sílica ativa na tentativa de minimizar o efeito da zona de interface realizaram a dopagem dos agregados, tendo como consequência a melhoria de suas características superficiais com formação de C-S-H e redução de vazios e de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Os autores afirmam que a dopagem pode ocorrer também durante a produção do concreto, com a própria ordem de mistura dos materiais, objetivando reduzir a porosidade da zona de interface. Cabe dizer que esse processo de dopagem é perfeitamente aplicável em agregados resistentes, já no caso de materiais friáveis e pouco resistentes cuidados especiais devem ser considerados, conforme será visto na seção 4.3.3. (Procedimentos de mistura).

Lima (2006) estudando concreto de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas promoveu a dopagem dos agregados com base no método de mistura dos agregados graúdos com a sílica ativa e 10% da água de amassamento previamente à adição dos demais materiais durante o processo de mistura do concreto.

Segundo Liborio e colaboradores (2005), o uso das adições minerais atua na microestrutura da pasta e na interface pasta/agregado refinando os poros. Na dopagem, o efeito químico é responsável pela formação de compostos hidratados e o efeito físico provoca obstrução e densificação. Portanto, a microestrutura torna-se refinada e homogênea, aumentando a compacidade, resistência e durabilidade.

A possibilidade de transformar agregados de baixa qualidade em agregados de boa qualidade para determinada finalidade, através do simples tratamento superficial do agregado, baseia-se, principalmente, na hipótese de melhoria da zona de transição na interface entre o agregado gráudo e a pasta de cimento. Então, no presente estudo, inicialmente caberá serem projetadas as características buscadas: formação de carapaça de proteção e aumento de rugosidade superficial do agregado, melhoria da zona de transição (modificação e/ou reforço de agregados, ligação concreto novo x concreto velho, reparos, continuidade de concretagens, etc.) e alta resistência do concreto. Além de diminuição do calor de hidratação, permeabilidade, porosidade e resistividade, e aumento de resistência ao impacto, resistência à tração, tenacidade, resiliência, etc.

Embora possa parecer que haverá grandes estudos para cada caso, na realidade, há composições de materiais que produzem concretos, argamassas e aglomerantes especiais (ainda hoje assim designado e que num futuro próximo deixará de ser) de alta resistência e duráveis, portanto de alto desempenho frente à maioria das necessidades.

Pelo fato da técnica de dopagem influenciar no comportamento da ligação entre a matriz e o agregado, é interessante abordar quais os tipos de ligações que podem ocorrer entre estes dois materiais, sendo os principais (COUTINHO, 1988):

a) ligação mecânica: em escala macroscópica, por rugosidade superficial do agregado em que os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas, muito maiores, da superfície dos materiais aglomerados;

b) aderência devida à absorção, pelo agregado, da água contendo parte do aglomerante dissolvido, o qual, após penetrar na superfície da partícula, cristaliza-se no mesmo tempo que a pasta, ligando-se a ela (BERTRANDY<sup>6</sup>, 1968 apud COUTINHO, 1988);

c) atração, sem continuidade da estrutura, entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, por força de Van der Waals - ligação puramente física;

d) continuidade da estrutura cristalina do inerte nos produtos da hidratação do cimento, por crescimento epitáxico<sup>7</sup> com ou sem formação de soluções sólidas intermediárias. Uma espécie de ligação, na qual os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongam os do agregado, têm em comum entre si as suas redes cristalinas (FARRAN<sup>8</sup>, 1956 apud COUTINHO, 1988);

---

<sup>6</sup> BERTRANDY, R., Les granulats clacaries dans les mortiers et bétons, **Travaux**, no 400, Jul-Agost, 1968, p.767.

<sup>7</sup> Crescimento de cristais do inerte na direção perpendicular à sua superfície.

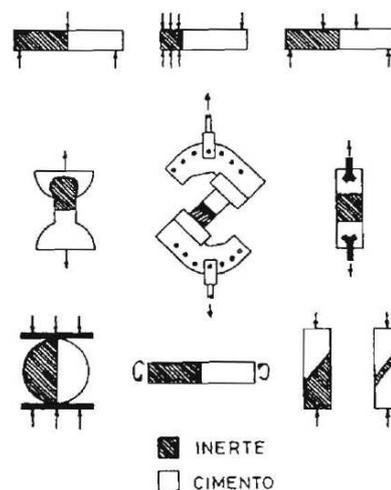
<sup>8</sup> FARRAN, J. Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre lês constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés, **Rev. Mat. Const.**, Jul-Agost. e Set. 1956, n<sup>os</sup> 490-491 e 492, (Publ. Tech. CERILH, n<sup>o</sup>78).

e) aderência química entre os produtos de reação da hidratação do cimento e a superfície do agregado.

Sob o ponto de vista geométrico, as aderências epitáxicas, ou por combinação química, estabelecem uma passagem contínua entre as redes dos componentes hidratados do cimento e as dos agregados, enquanto a aderência por rugosidade se traduz por contatos localizados e pelo aparecimento eventual de uma fissuração intersuperficial mais ou menos fina e extensa (COUTINHO, 1988).

Partindo da premissa de que a impregnação do agregado graúdo ocorrerá com sílicas e/ou associações com cimentos Portland de características especiais, podendo ser, inclusive, uma dopagem de alto desempenho, as próprias características do agregado dopado irão influenciar na resistência de todas as cinco ligações pasta/agregado citadas, no sentido de reforçá-las. Entretanto, dependendo das características físicas e mineralógicas de cada agregado, esse reforço poderá ser mais ou menos evidente em um ou outro tipo de ligação.

Existem vários ensaios para determinar a resistência da ligação entre o cimento e o agregado, que vão desde ensaios que medem a tensão de aderência por tração pura na superfície da ligação ou por tração indireta, por compressão diametral, até ensaios mais simples como o de flexão. Esses ensaios são mostrados na Figura 3.



**Figura 3: Esquema de ensaios para determinação da resistência de aderência entre o cimento e o agregado.**

**Fonte: Alexander; Wardlaw; Gilbert<sup>9</sup> (1968) apud Coutinho (1988).**

<sup>9</sup> ALEXANDER, K. M.; WARDLAW, J.; GILBERT, D. J. Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete, **Proc. Int. Conf. Structure of Concrete**, Londres 1965, Ed. Cem. Conc. Assoc., 1968, p.59.

Cada um dos tipos de ligações entre a pasta de cimento e o agregado pode interferir na qualidade dos concretos. Dentre as causas físicas da aderência, a mais importante é a ligação mecânica provocada pela rugosidade da superfície, a qual está associada a alterações na resistência e nas características elásticas do concreto.

Mesnager<sup>10</sup> (1923) apud Coutinho (1988), determinando a resistência de aderência por meio de tração pura, verificou que em calcários com absorção elevada, porosos, com baixa resistência, a resistência de aderência pode ser superior à do próprio calcário, enquanto que no caso de pedras compactas, com baixa absorção, a resistência de aderência pode ser inferior a um quarto da resistência da pasta de cimento.

A ligação do tipo continuidade da estrutura cristalina do inerte nos produtos da hidratação do cimento, por crescimento epitáxico, só pode aparecer excepcionalmente, pois os cristais dos componentes hidratados do cimento devem apresentar uma identidade da rede cristalina com os minerais do agregado. Portanto, a existência da ligação epitáxica não pode ser demonstrada a partir de ensaios de resistência, pois os constituintes hidratados epitaxicamente, depositados pelo cimento na superfície do agregado, são pouco resistentes, já que esta ligação é mecanicamente fraca. A influência desse tipo de ligação está associada à reação dos produtos da hidratação do cimento com os minerais do agregado.

Cussino e Pintor<sup>11</sup> (1972) apud Coutinho (1988) mostraram que com cimentos de elevado teor em aluminato tricálcico (de 10 a 13%) se obtêm resistências mais elevadas com o agregado calcário do que com o silicioso, enquanto com cimentos de teores mais baixos (0,6 a 1%) não há praticamente diferença entre os dois agregados. A influência do calcário no aumento da resistência de misturas confeccionadas com cimento rico em aluminato tricálcico pode, provavelmente, ser atribuída à formação dos carboaluminatos (LOTHENBACH e colaboradores, 2008).

A ligação do tipo aderência química ocorre entre os produtos de reação da hidratação do cimento e os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  liberados pelo agregado. Quando não há a liberação desses íons, a ligação será do tipo mecânica, ou seja, estabelecida por simples deposição dos constituintes hidratados do cimento nas reentrâncias do agregado; quando a distância for suficientemente pequena (inferior a alguns nanômetros), intervêm as forças de van der Waals (ligação do tipo atração). No caso do quartzo, a fase hidratada formada no contato é da mesma natureza da que se desenvolve mais longe, na massa do cimento, mas apresenta textura mais fina (COUTINHO, 1988).

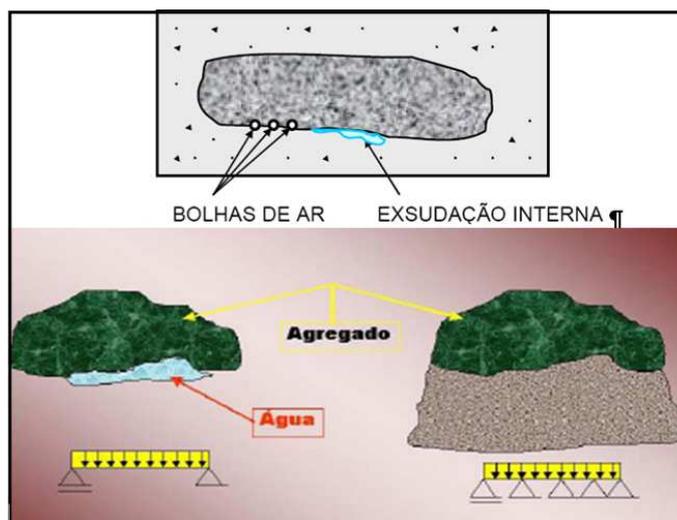
---

<sup>10</sup> MESNAGER, A. Matériaux de Construction. **Pierres**, Ed. J. B. Baillère et Fils, Paris 1923, p. 171.

<sup>11</sup> CUSSINO, L.; PINTOR, G. Indagine sul different comportamento degli inerti silicico e calcareo nei conglomerati in funzione della composizione mineralogica del cemento, **Il Cemento**, Out.-Dez. 1972, ano 69, n° 4, p. 255.

Normalmente os agregados não influenciam diretamente na resistência do concreto, uma vez que possuem resistência muito superior à da matriz e da zona de transição, exceto no caso de alguns agregados altamente porosos ou quebradiços, como a laterítica e a pedra-pomes. A resistência do concreto será afetada indiretamente, dependendo da dimensão e forma do agregado graúdo.

Ao considerar a problemática da forma do agregado e correlacioná-la com uma possível exsudação interna e acúmulo de bolhas, provavelmente esse comportamento irá colaborar na ruptura do concreto, conforme idealizado na Figura 4, já que esta situação pode levar a uma redução de pontos de transferência de tensões do agregado para a matriz. Liborio (2003) ilustra que o comportamento do agregado poderá ser similar à de uma viga simplesmente apoiada e que com determinado carregamento poderá ser rompido facilmente por flexão ou cisalhamento.



**Figura 4: Idealização do funcionamento de um agregado sob carregamento. Deficiência da zona de transição (à esquerda) e melhoria dessa região pela adição de sílica ativa advinda da dopagem (à direita).  
Fonte: Liborio (2003).**

Com a introdução da sílica ativa, por exemplo, ocorre a diminuição desse fenômeno (exsudação interna), comportando-se o agregado como uma viga contínua com apoios muito próximos uns dos outros, aumentando assim a resistência do sistema. O efeito da dopagem na zona de transição pasta/agregado será descrito a seguir, mas pode-se dizer de antemão que o resultado benéfico proporcionado ao agregado graúdo, e conseqüentemente ao concreto, é advindo da introdução da sílica ativa, dentre outros fatores.

No caso de agregados defeituosos, essa mesma consideração de aumento nos pontos de transferência de tensões, com conseqüente ganho de resistência do sistema, poderá ser feita, porque ele será modificado. As ações que poderão incidir sobre os agregados que receberem o tratamento, como por exemplo agregados leves (argilas expandidas) e agregados lateríticos, estarão próximas de um comportamento triaxial de tensões, aumentando consideravelmente o cintamento do sistema (LIBORIO, 2003).

Essa situação é “sui generis”, pois estende essa possibilidade para a condição de utilização de agregados, outrora considerados desconhecidos aos concretos, através de sua “armação” com uma matriz de alta qualidade. Isso foi pesquisado por Chagas Filho e Liborio (2002) e Futida e Liborio (2005), permitindo-se que se atinjam resistências elevadas, além da qualidade de alto desempenho, pela matriz que envolve o agregado.

Propiciando a dopagem de um agregado, pode-se então estabelecer a validade da definição clássica do material concreto, que é a sinergia da argamassa, com os agregados graúdos trabalhando efetivamente num comportamento único de um material constituído. A dopagem dos agregados com sílica ativa fortalece a superfície do agregado conferindo-lhe propriedades de uma viga continuamente apoiada (LIBORIO, 2003).

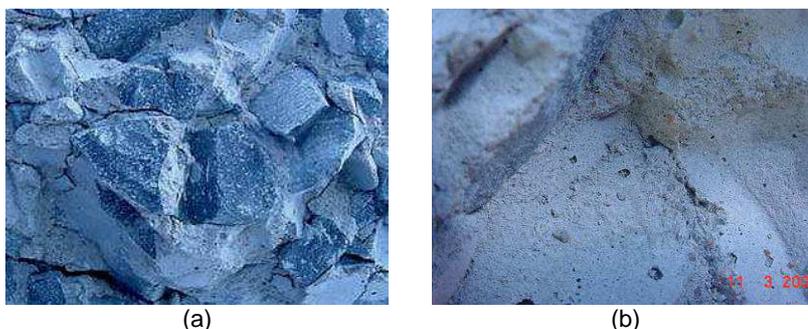
A textura do agregado é outro fator que influencia de forma significativa na resistência do concreto. Devido ao entrelaçamento mecânico, a textura superficial do agregado graúdo é parcialmente responsável pela ligação entre a matriz de cimento e o agregado. Quanto mais áspera a superfície do agregado, maior é o intertravamento mecânico entre ele e a matriz de cimento. Assim, o agregado proveniente de rocha britada produz aderência superior se comparada à do seixo rolado.

Mehta e Monteiro (1994) citam evidências de que, pelo menos nas primeiras idades, a resistência do concreto, em particular a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura superficial do agregado e que texturas mais ásperas favorecem a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado. Em idades mais avançadas, esse efeito não é tão importante, pois ocorre o desenvolvimento de uma forte aderência química entre a pasta e o agregado.

A aderência pasta/agregado é influenciada por outras propriedades físicas e químicas do agregado, relacionadas com sua composição química e mineralógica e com a condição eletrostática da superfície. Aparentemente, a relação entre a resistência de aderência e a resistência da pasta de cimento aumenta com o tempo. Nos concretos, a interface entre o agregado e a pasta de cimento que o envolve pode ser considerada um local onde a ruptura tende a se localizar, pois o agregado significa uma descontinuidade, dando origem a um efeito parede.

A textura do agregado pode, então, influenciar na aderência dos materiais. Quando essa aderência apresenta-se com características de baixa adesividade, o resultado poderá ser a ocorrência de uma zona de transição debilitada, conforme Figura 5 (LIBORIO, 2003). Observa-se, em “a”, em um corpo de prova rompido de concreto com 23 MPa que, embora tenha sido atendida a resistência mecânica, a aderência está muito prejudicada, com os agregados desprendendo-se integralmente da argamassa e da pasta. No caso “b”, que é o local onde estavam os agregados de “a”, observa-se uma superfície lisa, cheia de poros (exsudação interna), que é rica em  $\text{Ca(OH)}_2$  – parte frágil dos concretos.

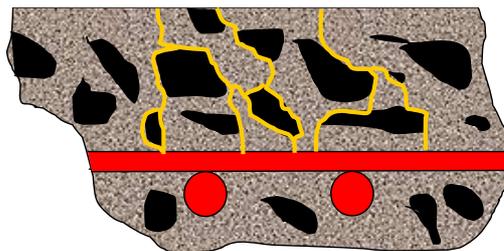
A técnica de dopagem resolve tal problemática, já que proporciona melhor aderência entre a pasta e o agregado, por meio da modificação da textura superficial, e diminui a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  presente na zona de transição, com incremento de C-S-H.



**Figura 5: Concreto convencional: ligação frágil entre os agregados e a argamassa.  
Fonte: Liborio (2003).**

A situação mostrada na Figura 5 é análoga a uma situação de uma estrutura rompendo-se por punção, isto é, sem que toda capacidade da armadura de um elemento estrutural esteja exaurida. Esse concreto é, portanto antieconômico! Não se trata apenas de uma ocorrência em termos de valores do material, e sim um prejuízo enorme, durante o uso da construção, pois estará aberto o caminho para uma deterioração total do material (LIBORIO, 2003).

Ao invés dos agregados se tornarem um obstáculo para a penetração de agentes agressivos, os seus contornos, pela sua porosidade, serão caminhos mais fáceis para que os gases e sais agressivos atinjam a armadura, conforme Figura 6 (LIBORIO, 2003).



**Figura 6: Caminhos preferenciais de penetração de agentes agressivos: casos de concretos com alta relação água/cimento e baixa compactidade.**  
Fonte: Liborio (2003).

A zona de transição poderá ser melhorada pelo simples tratamento superficial do agregado ou de superfícies em geral. Liborio (2003) menciona que é possível dopar agregados de baixa qualidade com os mesmos materiais que irão compor o concreto de alto desempenho, transformando-os em agregados de boa qualidade para determinada finalidade.

A hipótese da dopagem de materiais também é válida quando se quer juntar duas peças, como um revestimento cerâmico ou um chapisco, ou argamassa, em substratos de pouca aderência (SILVA, 2000; FAGURY, 2002; SILVA, 2004; FUTIDA; LIBORIO, 2005; TRIGO; CONCEIÇÃO; LIBORIO, 2010).

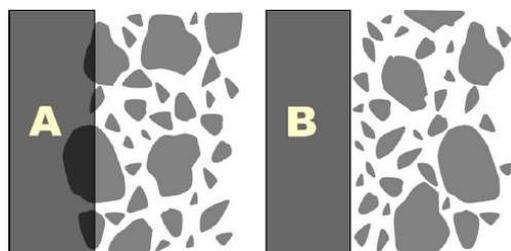
## 2.2. A dopagem e a melhoria da zona de transição

Para obter concretos de melhor qualidade, além do refinamento de poros da matriz cimentícia do concreto e do uso de agregados de boa qualidade, é necessário melhorar também a ligação entre a matriz e o agregado. O foco da dopagem de agregados para a melhoria da zona de transição pasta/agregado se baseia justamente no fato desta região ser mais porosa, com concentração maior de produtos mais frágeis e onde haverá a formação preferencial de microfissuras, o que acaba por governar o comportamento do concreto.

A zona de transição é considerada como uma região estendendo-se radialmente para fora da superfície do agregado e, gradualmente fundindo-se com a massa da microestrutura da pasta, com uma espessura de 10  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ , aproximadamente. Essa medida tem sido tomada levando-se em conta o limite no qual a pasta de cimento é afetada pelo agregado.

As técnicas usuais para os estudos da zona de transição têm sido a difração por raios-X e a microscopia eletrônica de varredura (MEV), incluindo, mais recentemente, o uso de microscopia com espectroscopia por dispersão de energia (EDS).

Segundo Scrivener, Crumbie e Laugesen (2004), a origem da zona de transição está no efeito “parede” proporcionado pela superfície do agregado, que interrompe o empacotamento dos grãos de cimento próximos à ela. Como pode ser visto na Figura 7, se um objeto for colocado em um conjunto aleatório de grãos, ele cortará completamente muitos grãos (A). Como isto é fisicamente impossível no caso de partículas de agregado na pasta de cimento, o empacotamento normal dos grãos de cimento é interrompido criando uma zona com porosidade mais elevada e com grãos menores próximos ao “agregado” (B).



**Figura 7: Ilustração do efeito “parede”.**  
**Fonte: Scrivener; Crumbie; Laugesen (2004).**

O efeito “parede” é diretamente responsável pelas características na zona de transição, principalmente pela sua alta porosidade. Uma explicação complementar para as características especiais dessa região é que durante a vibração do concreto, o efeito de exsudação interna conduz ao acúmulo de água sob as partículas de agregado, acarretando em heterogeneidade nos gradientes de água e cimento anidro em torno das partículas (SCRIVENER; CRUMBIE; LAUGESSEN, 2004; AÏTCIN, 2000; SILVA, 2000).

Durante a hidratação do cimento anidro são formadas duas fases hidratadas principais – o silicato de cálcio hidratado, C-S-H, e o hidróxido de cálcio, CH. Nos primeiros segundos, a concentração de silicato na solução permanece muito baixa e conseqüentemente a fase C-S-H é, na maior parte, depositada diretamente em volta dos grãos de cimento. Diferentemente, a concentração de cálcio na solução é muito alta e o CH é depositado, na maior parte, dentro dos poros (SCRIVENER; CRUMBIE; LAUGESSEN, 2004; MELO, 2000; SILVA, 2000).

Como a zona de transição é inicialmente mais porosa isto favorece o depósito de maior quantidade de CH nesta região e também a formação de cristais maiores. Dado o fato de que o CH é um composto mais frágil que o C-S-H e, além disso, quando examinado por

feixe de elétrons, apresenta-se orientado preferencialmente com o eixo central normal à superfície do agregado, isto favorece o surgimento de microfissuras nessa região (SCRIVENER; CRUMBIE; LAUGESSEN, 2004).

O início da fissuração é mais fácil em cristais de tamanho grande do que em sistemas de cristais de pequena dimensão e emaranhados apertados. Além do que, a orientação preferencial mostrada pelos cristais da zona de transição favorece a propagação das fissuras.

Pelas razões expostas, a zona de transição é, geralmente, mais fraca que as outras duas fases do concreto, exercendo uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico (por ser um local suscetível à formação de microfissuras) e sobre a durabilidade deste material (MASO, 1996). Pelo fato da região da interface ser a região mais frágil do concreto, quando este é submetido a alguma tensão, espera-se que as primeiras fissuras apareçam na zona de transição.

Baseado então que, nas primeiras idades, o volume e tamanho dos vazios na zona de transição são maiores do que na matriz pasta de cimento, especialmente quando ocorre considerável exsudação interna, e que nesta região o tamanho e a concentração de portlandita (CH) também são maiores, é justamente neste momento que a dopagem de materiais torna-se interessante. Isso porque, com a portlandita formada, se houver a adição de pozolanas, para atuar em particular na zona de transição, haverá a transformação dessa fase em C-S-H, muito resistente e aderente a substratos diversos, quer sejam eles armadura de reforço ou o próprio agregado.

Quando a adição mineral é introduzida na pasta de cimento Portland (no caso deste estudo, especificamente na pasta de dopagem) surgem dois efeitos: o pozolânico (incremento de silicato de cálcio hidratado, oriundo da transformação do hidróxido de cálcio) e o microfíler (preenchimento físico dos vazios).

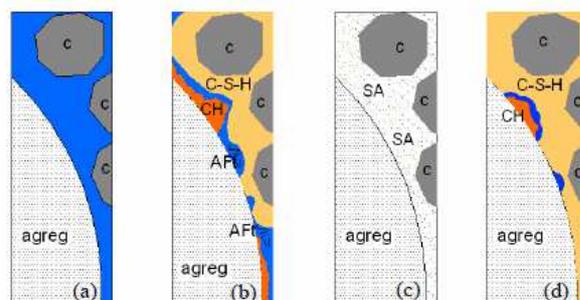
O efeito microfíler da sílica ativa no concreto, ou de qualquer outro material muito fino, altera a microestrutura da zona de transição pelo fato de interferir na movimentação das partículas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que normalmente fica retido sob os agregados (exsudação interna), o que resulta em diminuição da espessura da zona de transição. Além disso, a sílica ativa quando desaglomerada pode preencher os vazios próximos à superfície do agregado (deixados pelas partículas de cimento), interferir no crescimento dos cristais, restringindo seus tamanhos e reduzindo o grau de orientação dos cristais de CH junto ao agregado (partículas de adição agindo como pontos de nucleação), e reduzir a concentração de CH (devido às reações pozolânicas).

A associação dos efeitos pozolânico e microfíler leva a um aumento significativo na compactidade das misturas cimentícias, apresentando um volume de vazios sensivelmente menor; redução da permeabilidade em até 100 vezes, já que a sílica ativa reduz o número e o tamanho dos capilares; além de um fortalecimento da microestrutura e de um refinamento dos poros (Silva, 2000). Outros efeitos são notados e estão correlacionados: a velocidade do fluxo interno de líquido na pasta é reduzida; e a coesão interna, o número de sítios de nucleação e a ligação dos grãos de cimento e das partículas de sílica com os produtos de reação são aumentados.

Com o aumento da coesão da pasta e com praticamente ausência de exsudação interna (na zona de interface), ocorre diminuição de concentração de tensões no sistema matriz x agregado, que associada à produção de maior quantidade de C-S-H, se traduz em acréscimo de resistência para o concreto.

Aproveitando-se desses benefícios para melhorar a microestrutura da zona de transição, é possível preencher os vazios na pasta e melhorar o empacotamento entre todas as partículas, ocasionando a diminuição do efeito parede e proporcionando uma maior compactidade localizada; portanto, uma ligação mais eficiente entre a pasta e o agregado. É importante lembrar que a eficiência da sílica ativa, tanto como material pozolânico de reação rápida quanto como fíler de alta eficiência, resulta em diminuição rápida da espessura da zona de transição, porém somente após os três primeiros dias (PAULON, 1996). O somatório de todos esses efeitos repercute numa melhora significativa da zona de transição, refletindo num aumento do desempenho do concreto sob o ponto de vista tanto mecânico quanto de durabilidade.

Na Figura 8 é apresentado o efeito da sílica na zona de transição pasta/agregado, onde os casos (a) e (b) correspondem ao concreto sem sílica e os casos (c) e (d), ao concreto com sílica ativa.



**Figura 8: Atuação da sílica ativa na interface pasta/agregado.**  
Fonte: Almeida (1996).

No caso (a) é observado grande espaço preenchido pela água em torno do agregado, devido à exsudação e ao empacotamento deficiente dos grãos de cimento na interface. O caso (b) mostra a zona de transição em estágio mais avançado, com o preenchimento do CH e C-S-H. Nota-se ainda a presença de espaços vazios, alguns dos quais preenchidos com materiais aciculares, provavelmente etringita (Aft). No caso (c) observa-se que o mesmo espaço ocupado pela água do caso (a) é preenchido por partículas de sílica ativa e, em comparação com o caso (b), o caso (d) mostra a zona de transição menos porosa, em um estágio também mais avançado.

Larbi e Bijen (1992), em programa experimental, mostraram que a substituição de 20% da massa de cimento por sílica ativa, possui forte efeito no índice de orientação dos cristais de CH na interface pasta/agregado e na espessura da zona de transição. Observa-se, na Tabela 1, que, à medida que o período de cura evolui a espessura da zona de transição da mistura de referência permanece praticamente a mesma, enquanto o índice de orientação aumenta. Para as misturas com sílica ativa, a zona de transição torna-se menor, e o índice de orientação decresce, sugerindo a ocorrência de uma densificação da pasta de cimento na interface e consumo de CH.

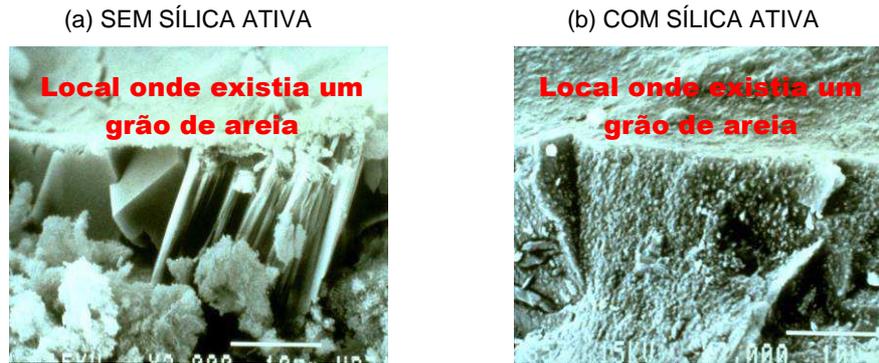
**Tabela 1: Índice de orientação máximo ( $I_{CHmáx}$ )<sup>12</sup> dos cristais de CH e espessura da zona de transição ( $\delta$ ), na interface granito – pasta com relação água/(cimento+sílica ativa) = 0,30.**

AGLOMERANTE	7 dias		28 dias		100 dias	
	$I_{CHmáx}$	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )	$I_{CHmáx}$	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )	$I_{CHmáx}$	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )
cimento Portland comum	3,3	53,8	3,6	32,7	4,0	50,3
80% cimento Portland comum + 20% sílica ativa	2,5	50,9	2,0	20,0	1,8	7,3

**Fonte: Larbi; Bijen (1992).**

Usando a sílica ativa para modificar a zona de transição dos concretos convencionais, Bentur e Cohen (1987) estudaram as diferenças em produzir argamassas com e sem sílica ativa, e verificaram que, entre os agregados e a pasta de cimento, pode existir uma zona de transição, que varia de 20 $\mu\text{m}$  a 50 $\mu\text{m}$ , conforme Figura 9.

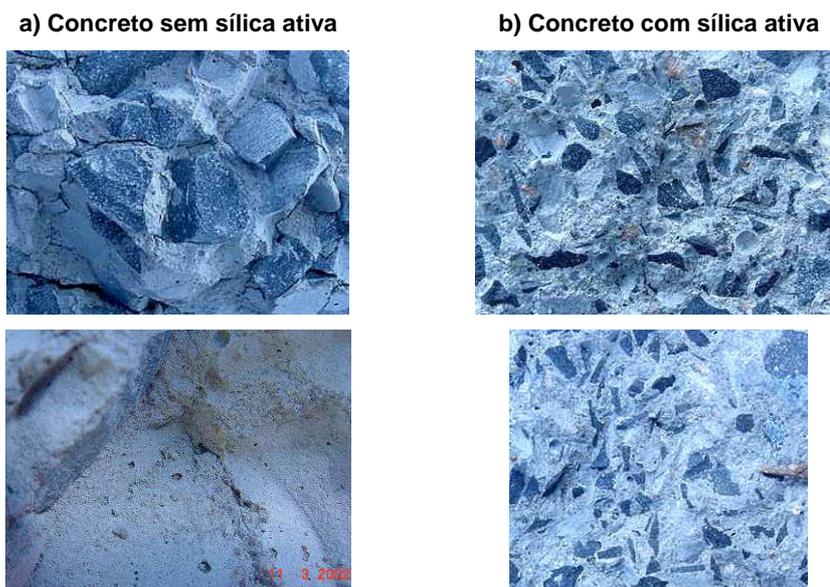
<sup>12</sup> O índice de orientação dos cristais de CH é máximo quando estes se encontram orientados com o eixo central normal à superfície do agregado (Fonte: Larbi; Bijen, 1992).



**Figura 9: Micrografias retratando as zonas de transição em diferentes concretos, com e sem sílica ativa**  
**Fonte: Bentur; Cohen (1987).**

No caso (a), da Figura 9, a argamassa foi confeccionada sem adição de sílica ativa, o que proporcionou uma região com grande quantidade de cristais de portlandita, com muitos poros, e descrita essa região pelos autores, como região de concentração de água livre. No caso (b) a argamassa foi confeccionada com adição de sílica ativa, o que proporcionou a formação de camada densa devido à reação pozolânica que transforma o portlandita em silicato de cálcio hidratado, aderente e resistente. A precipitação do silicato de cálcio hidratado refina e desconecta os poros.

Essas considerações ajudam a explicar as diferenças de ruptura, por exemplo, entre um concreto estrutural utilizado na construção de edifícios em São Carlos e outro produzido com adição de sílica ativa, conforme Figura 10 (Liborio, 2003). No primeiro caso (a), a ruptura do concreto contorna a brita, rompendo-se na zona de transição e, no caso seguinte (b), não há destacamento do agregado graúdo, ocorrendo a ruptura do agregado graúdo.



**Figura 10: Diferenças da forma de ruptura em concreto sem e com sílica ativa.**  
**Fonte: Liborio (2003).**

Assim, com a introdução de sílica ativa nos concretos, as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade dos mesmos são melhoradas, enquanto a permeabilidade é reduzida. Com o refinamento dos poros, a zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento com sílica é drasticamente reduzida e as exsudações interna e superficial da mistura são minimizadas. Tudo isso leva a um alto desempenho do concreto com conseqüente aumento de sua durabilidade.

A consideração do alto desempenho de um material constituído está então correlacionada, dentre outros parâmetros, com a existência ou não de fissuras, porosidade conectada, refinamento de poros, etc., mas é sem dúvida um parâmetro controlado pela qualidade da matriz, por sua capacidade aderente, coesão, pela quantidade de C-S-H formado ao redor das partículas dos agregados, e pelo nível de proteções, física e química, estabelecidas no contorno da armadura de reforço.

Uma vez apresentados e explanados os inúmeros benefícios conseguidos com o uso de adições minerais em misturas cimentícias, em particular com o emprego da sílica ativa, é pertinente destacar que a inserção desta adição nas composições de dopagem visa:

- Reduzir ou eliminar a exsudação em torno da partícula de agregado.
- Melhorar a carapaça que envolve o agregado, através do aumento da impermeabilidade da composição cimentícia: as finas partículas preenchem os vazios, diminuindo a porosidade.

- Aumentar a impermeabilidade do próprio agregado: já que a porosidade da composição cimentícia é diminuída e esta composição, por sua vez, penetra nas reentrâncias do agregado, diminuindo, conseqüentemente, a porosidade deste material.
- Proteção do agregado contra ataques químicos, uma vez que o mesmo estará envolto em uma carapaça com características melhoradas.

### 2.3. Agregados potencialmente utilizáveis

Os agregados graúdos que podem vir a ser utilizados com a técnica de dopagem devem ser escolhidos com base no diagnóstico feito por mineradoras e/ou construtoras que desejam explorar novas fontes de materiais. Devem ser fornecidas informações a respeito da disponibilidade desses materiais e também a demanda da região ou a necessidade de grandes obras naquele local, justificando-se o estudo e a exploração de tais recursos.

Neste estudo, a avaliação dos locais promissores quanto ao uso de “novos” agregados foi feita através de um estudo de pesquisa na internet, considerando-se centros urbanos importantes<sup>13</sup>, que são locais onde poderão ocorrer grandes obras *versus* disponibilidades regionais de agregados, ou através de órgãos que forneçam um mapeamento geológico ou em departamentos de entidades de ensino e pesquisa, promovendo as identificações e verificações de disponibilidades<sup>14</sup>.

Qualquer estudo sobre reservas de minerais para agregados deve considerar o planejamento local existente e/ou as restrições que a sociedade impõe à mineração. As reservas de ótima qualidade existem em abundância, todavia a lavra<sup>15</sup> está condicionada à sua localização e à legislação vigente.

O Brasil incentiva a mineração por entender que esta atividade contribui para o desenvolvimento sócio-econômico. No entanto, a carga tributária sobre ela incidente, elevada, fomenta convênios, alíquotas e base de cálculo diferenciada que são fatos geradores de mineração predatória, clandestina e nociva ao meio ambiente. Por isto, há correntes que defendem a cobrança de uma taxa sobre a utilização da areia, por exemplo, para estimular o investimento em pesquisa de materiais substitutivos, uma vez que é preciso aprender a substituí-los, inteirando-se das novas tecnologias já existentes no mercado ou

---

<sup>13</sup> <http://www.tributarista.adm.br/impostometro/home/municipio.form.php> acessado em 2 de abril de 2009.

<sup>14</sup> Neste âmbito se buscou ajuda junto ao departamento de Geotécnica da EESC USP.

<sup>15</sup> Fase da mineração representada pelo conjunto de operações que tem como objetivo a extração econômica das diversas substâncias minerais úteis de uma jazida até o seu beneficiamento primário.

propondo-se outras novas como no caso deste estudo, para combater o desperdício, para reduzir o consumo e para confeccionar normas mais rígidas para os empreendedores do ramo de extração de areia, tais como a exigência de garantias financeiras para a exploração, da mesma ordem dos custos de reparação ou mitigação dos danos ambientais (BITAR, 2000).

A mineração, embora seja uma atividade industrial importante e necessária, produz impactos ambientais desde as fases de extração, beneficiamento e refino até o fechamento de mina. Ela tem sido considerada uma atividade que tem causado problemas de poluição sonora, da água e do ar, erosão e subsidência<sup>16</sup> do terreno. Também têm sido associadas à mineração questões sociais, como: conflitos pelo uso do solo, depreciação de imóveis circunvizinhos, geração de áreas degradadas e transtornos ao tráfego urbano (MECHI e SANCHES, 2010).

Os principais impactos ambientais causados pela extração mineral de agregados são (MECHI; SANCHES, 2010):

- Alteração da paisagem.
- Supressão da vegetação, principalmente da mata ciliar.
- Alteração nas calhas dos cursos d'água.
- Instabilidade de margens e taludes.
- Turbidez da água.
- Lançamento de efluentes.

No contexto urbano, os impactos da mineração são agravados pela proximidade entre áreas mineradas e aquelas habitadas. É o caso das vibrações, ruídos e dos impactos visuais causados pelos altos volumes de rocha e terra movimentados. Em termos gerais, os maiores problemas ambientais não se devem à mineração moderna, que dispõe de meios técnicos e recursos para manter a situação sob controle, de acordo com as legislações ambientais e atendendo às expectativas e reivindicações das populações locais.

Uma parcela significativa dos problemas vividos hoje foi herdada do passado, em forma de passivo ambiental. Os rejeitos das minas contêm substâncias nocivas ao ambiente e ao homem, que continuam a causar problemas mesmo depois do fim do ciclo minerário. Estratégias de remediação (que incluem a descontaminação da água de uso doméstico e de

---

<sup>16</sup> Processo caracterizado pelo afundamento da superfície de um terreno em relação as áreas circunvizinhas (Fonte: IBGE, 2004).

solos) devem ser executadas a partir de um melhor conhecimento dos processos naturais, da implementação de tecnologias, e da conscientização das autoridades, empresas e organizações civis (CABRAL JUNIOR e colaboradores, 2008).

O uso intenso de areia, brita e argila na construção civil, que vem diminuindo as jazidas disponíveis destes materiais e provocando conflitos com outras formas de ocupação do solo, é um exemplo de atividade mineradora exploratória irregular. Atualmente, junto às grandes metrópoles brasileiras, é comum encontrar enormes áreas degradadas pela extração destes materiais (Figura 11).



**Figura 11:** Jazida de granito – Ceará.

Fonte: BACELLAR, 2001.

Por sua importância em habitação, saneamento e transportes, os agregados naturais são considerados como bens minerais de uso social, sendo seu índice de exploração bastante expressivo. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2011), a indústria da construção civil no Brasil consumiu, em 2008, 693 milhões de toneladas de agregados, sendo 253 milhões de toneladas de pedra britada. Estima-se que cerca de 370 milhões de toneladas de agregados são consumidos anualmente no Brasil, somente na produção de concretos e argamassas.

O consumo aparente de agregados para construção civil coincide com o próprio quantitativo produzido internamente no país, pois praticamente inexistente comércio exterior destas substâncias. O estado de São Paulo é o principal produtor e consumidor, concentrando cerca de 48% da produção bruta e do consumo. Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e Santa Catarina também se destacam em termos de quantidades

produzidas e consumidas. Em contrapartida, os estados do Norte e Nordeste não chegam a produzir e consumir 10% de pedra britada (DNPM, 2011).

A produção da pedra britada caracteriza-se pelo baixo valor unitário e pela produção de grandes volumes. Entretanto, como os custos de transporte inviabilizam o comércio entre grandes distâncias, a escala de produção fica restrita aos volumes compatíveis com o que cada mercado regional pode absorver. Isto explica um dos motivos que regiões como Norte e Nordeste, onde não são produzidos volumes significativos de pedra britada, têm em aproveitarem agregados alternativos.

Na área da construção civil, os agregados alternativos são utilizados para os mais variados fins, desde a confecção de concreto, lastro de ferrovias ou obras de saneamento, pavimentação e drenagem. Outro fato que motiva o uso de agregados alternativos é que, para essas regiões, torna-se inviável economicamente importar agregados britados de centros produtores, dado o custo de transporte do material britado, que chega a representar dois terços do seu custo final, encarecendo e inviabilizando qualquer tipo de obra (FRAZÃO, 2010).

No aspecto regional, na Bacia sedimentar do Paraná, os afloramentos de rocha para britagem são difíceis de serem encontrados, criando-se a necessidade de transportar a brita por distâncias superiores a 100 km. No Estado do Acre e grandes regiões amazônicas não há reservas de boa qualidade. No Acre a indústria da construção civil local utiliza brita oriunda de jazidas localizadas no Estado vizinho de Rondônia (BACELLAR, 2001).

Grande parte dos maciços da região Amazônica foi formada no interior de uma bacia intracratônica, gerando sedimentos inconsolidados de pequena textura, tais como areia, silte e argila. Desta forma, as principais capitais amazônicas, Manaus, Belém e Rio Branco, bem como mais da metade da área do estado do Amazonas, não são cobertas por rochas. Desta forma, destaca-se, nestas áreas, o uso de agregados naturais (seixo rolado principalmente), para serem empregados na construção civil. Manaus, capital do estado do Amazonas, consome cerca de 600.000 m<sup>3</sup> de agregado graúdo anualmente, sendo a metade desse total adquirido pelas centrais dosadoras locais (BACELLAR, 2001). Desse quantitativo, cerca de 90% é de agregado na forma de seixo rolado. As pedreiras de rocha são localizadas longe do maior centro consumidor, como é o caso do município de Presidente Figueiredo que se encontra a aproximadamente 130 km de Manaus, e por causa disto a opção é quase sempre o emprego de seixo rolado, extraído do fundo dos rios (CABRAL e colaboradores, 2008).

O seixo rolado é formado por fragmentos de minerais e/ou de rochas preexistentes oriundos do desgaste da rocha sedimentar, seja pela forte ação das águas (passagem da água em correnteza ou rolagem de pedras) ou pela ação dos ventos (rolagem de pedras). Quando depositado dá origem à cascalheira. Outro modo de formação do seixo rolado se dá pela forte variação da temperatura entre o frio e o quente, gerando seixos com formas mais angulares do que arredondados.

O fato de o seixo rolado apresentar forma arredondada, quando empregado em concretos, resulta em diminuição do índice de vazios, exigindo, portanto, uma menor quantidade de pasta para envolver o agregado. Além disso, sua forma arredondada permite o uso de menor quantidade de água no concreto, mantendo-se a mesma trabalhabilidade de um concreto confeccionado com brita basáltica, por exemplo; ou então, neste mesmo raciocínio, uma melhor trabalhabilidade, mantendo-se a quantidade de água da mistura (CARNEIRO; BARATA; PICANÇO, 2002). Embora possibilite a redução da água de amassamento e melhore a resistência do concreto endurecido, o seixo rolado pode dificultar a aderência dos materiais, prejudicando a ligação na zona de interface pasta/agregado e comprometendo assim o desempenho do concreto.

O formato arredondado e a textura lisa do seixo rolado podem influenciar na aderência dos materiais pela própria ocorrência de uma zona de transição debilitada, com características de baixa adesividade. Entretanto, em regiões com escassez de rochas naturais de boa qualidade e de alta resistência, o seixo rolado pode ser uma boa alternativa, que ainda pode ser mais atrativa caso seja reforçada a adesividade deste material à pasta de cimento. A técnica de dopagem proposta neste estudo pode solucionar esta problemática!

Enfim, levando-se em consideração que as regiões Norte e Nordeste utilizam o seixo rolado na construção civil e que as características físicas deste agregado, principalmente a textura superficial, não favorecem seu emprego em concretos, julga-se interessante, para este estudo, avaliar o desempenho de concretos estruturais confeccionados com seixo rolado.

O uso de agregado alternativos na construção civil se fortalece na medida em que restrições geológicas e de ordem ambiental são impostas. Por exemplo, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro<sup>17</sup>, nos locais acima da cota de 100 metros, é proibida a extração de rocha<sup>18</sup>, restringindo tanto o nível de produção quanto à vida útil das pedreiras

---

<sup>17</sup> A Região Metropolitana de Rio de Janeiro é composta por 20 municípios e corresponde a 2,56% do território estadual.

<sup>18</sup> Mineração em APP – RESOLUÇÃO Nº 369, DE 28 DE MARÇO DE 2006 DOU de 29 de março de 2006.

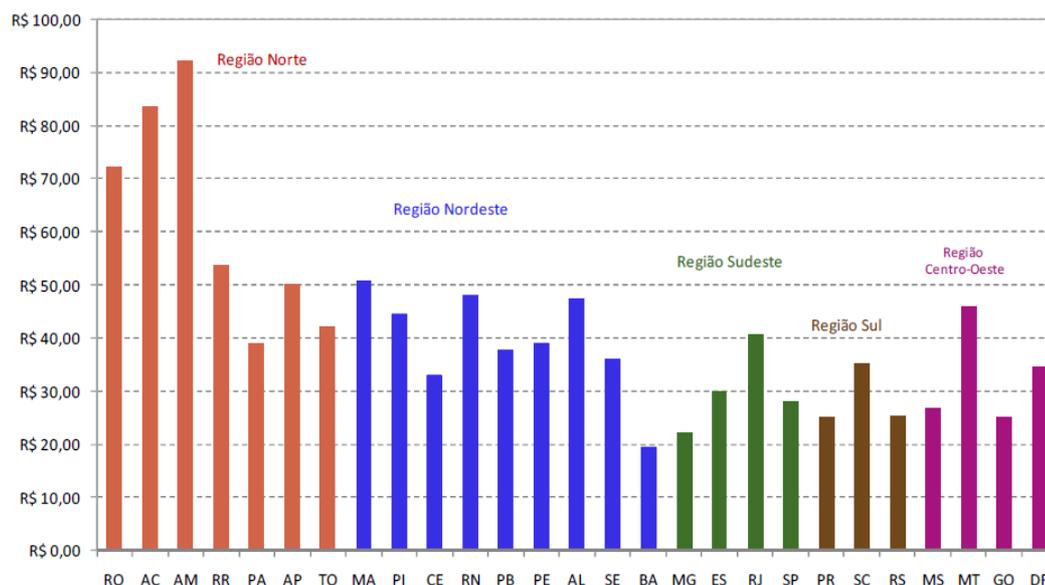
em operação, além de inviabilizar a abertura de novas pedreiras. Desta forma, o que leva à procura por materiais alternativos, em se tratando, neste caso, de agregados para a construção civil, é justamente o confronto tanto com as restrições geológicas quanto com aquelas de ordem ambiental, somadas, ainda, com a elevação do preço final do material.

Os preços dos agregados para construção civil, diferentemente dos demais produtos da indústria mineral, apresentam a peculiaridade de serem determinados localmente, ou seja, em cada um dos micromercados regionalizados. Esse fato é devido a inexistir comércio a grandes distâncias, por causa do baixo valor unitário dos produtos. Por isso o preço pode variar muito entre os diversos estados e regiões metropolitanas. Em paralelo, a areia e os agregados naturais estão ficando cada vez mais escassos, inclusive graças ao crescente controle ambiental da extração das matérias primas, o que acarreta em elevação do custo desses materiais (TANNÚS e colaboradores, 2007). Em São Paulo, a areia natural, em sua grande maioria, viaja distâncias superiores a 100 km, sendo comercializada a valores em torno de R\$30/m<sup>3</sup>. Além do transporte, outro item importante de custo são os equipamentos e peças de reposição, fato normal ao setor mineral, que geralmente é intensivo em tecnologia. Entretanto, para agregados de construção civil, a tecnologia não representa um custo mais significativo do que o transporte, devido à relativa baixa intensidade tecnológica da mineração de agregados, em comparação aos demais produtos da indústria mineral.

Nas capitais menos populosas, onde o setor privado de construção civil não é tão grande, o preço é muito influenciado pelas obras públicas e programas de melhorias na infra-estrutura implementados pelos governos que se sucedem a cada 4 anos. Os preços apresentados na Figura 12 são médias referentes ao período de janeiro a julho de 2009, das séries históricas do SINAPI – IBGE<sup>19</sup> (após conversão para a escala R\$ / tonelada). Removeu-se a inflação do período pelo INCC-M (Índice Nacional da Construção Civil), tendo como base o mês de julho de 2009.

---

<sup>19</sup> IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA – Construção Civil. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em 07/01/2011.



**Figura 12: Preço médio da tonelada de pedra britada nº 02 por região – Jan-Jul/2009.**  
**Fonte: SINAPI – IBGE (2010).**

Observa-se (Figura 12) que a média nacional de preço da brita número 02 foi de R\$ 38/m<sup>3</sup> (em valores constantes<sup>20</sup>). Os estados de Bahia, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul, tiveram os menores preços médios e, em contrapartida, os estados de Amazonas, Acre e Rondônia apresentaram os maiores preços médios. Fica claro que os preços médios da brita 02 foram mais voláteis na região norte, sobressaindo nesse aspecto o estado do Amazonas, com os maiores valores do país. A região norte é desfavorecida em ocorrência de jazidas de boa qualidade. No Acre, a brita é oriunda do estado vizinho de Rondônia, sendo encarecida pelo transporte.

Tanto na região Norte como na Nordeste, mas, principalmente, na região Norte, a possibilidade de utilização de outro recurso, em substituição à pedra britada, é extremamente importante, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Além do uso e aproveitamento do seixo rolado como agregado para o setor da construção civil (material citado anteriormente), outro agregado que se mostra promissor para essas áreas é a laterita.

A laterita é uma rocha em processo de formação ou formada por meio de intenso intemperismo químico de rochas preexistentes, inclusive lateritas antigas, sob condições tropicais ou equivalentes. Pode apresentar textura alveolar, caracterizada por poros e cavidades visíveis, que influencia tanto em sua aderência com a pasta de cimento quanto na demanda de água da mistura cimentícia (MOIZINHO, 2007).

<sup>20</sup> Valores constantes, em base de Jul/2009. Deflacionados pelo INCC.

O termo laterita provém do Latim e significa tijolo. São ricas em ferro e alumínio e pobres em silício, potássio e magnésio se comparadas com a rocha que lhe deu origem.

A laterita pode ser compacta, coesa, incoesa, terrosa ou argilosa, com coloração vermelha, violeta, amarela, marrom até branca. Sua composição mineralógica envolve geralmente oxi-hidróxidos de ferro (hematita, maghemita e goethita), de alumínio (gibbsita, boehmita a Al-goethita), de titânio e de manganês (litoforita, todorokita), além de argilominerais (caulinita, esmectita, halloysita), fosfatos de alumínio (crandalita-goyasita, variscita, angelita, wardita) e resistatos (turmalina, cassiterita, rutilo, etc.)<sup>21</sup>.

Na Figura 13 podem ser vistas amostras de lateritas observadas em microscópio ótico.

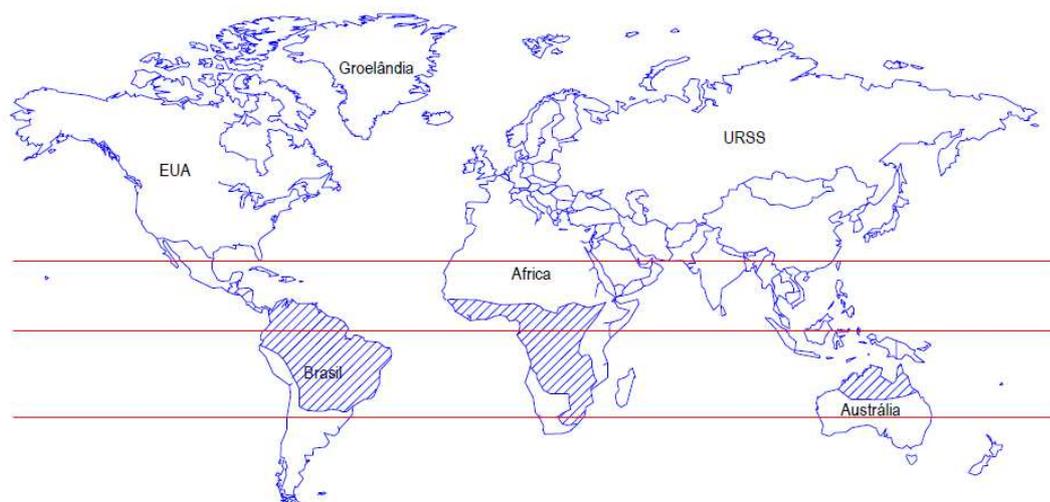


**Figura 13: Amostras de lateritas em microscópio ótico (aumento de 50 vezes).  
Fonte: Futida (2005).**

O solo laterítico é encontrado na faixa de clima tropical do planeta. A América do Sul, África e norte da Ásia possuem grandes extensões destes solos (Figura 14). O Brasil possui grandes reservas nas regiões Norte e Nordeste (CHAGAS FILHO; PERAZZO BARBOSA, 2000).

---

<sup>21</sup> IBGE. Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente. RJ: 2004.



**Figura 14: Mapa mundial mostrando as regiões de ocorrência de solos lateríticos. (SANTANA; GONTIJO<sup>22</sup>, 1987 apud CHAGAS FILHO, 2005).**

Segundo Melfi (1997), as altas temperaturas encontradas nas regiões tropicais, promovem a rápida degradação da matéria orgânica, que é totalmente mineralizada, dando origem à água e ao CO<sub>2</sub>. O gás carbônico confere caráter levemente ácido (pH ~ 5,5 - 6) às soluções de alteração. Nestas condições de pH há certo controle no comportamento dos principais constituintes dos minerais formadores das rochas. O alumínio e o ferro são praticamente insolúveis, acumulando-se na forma de óxidos e hidróxidos. Os elementos alcalinos e alcalinos terrosos são praticamente lixiviados, enquanto que a sílica também é mobilizada, porém com velocidade mais baixa que os alcalinos, havendo possibilidade, em certas situações, de recombinação de parte da sílica com o alumínio que permaneceu “in situ”, gerando argilominerais.

A alta concentração dos hidróxidos de Fe e Al pouco solúveis leva a formação de uma crosta ou carapaça laterítica muito resistente aos agentes erosivos. Assim, a laterita torna-se mais solúvel em ambientes mais ácidos e menos solúvel em ambientes mais alcalinos, adequando-se, portanto, aos concretos.

A comunidade geológica brasileira mostrou interesse pelo estudo das lateritas da Região Amazônica, principalmente a partir da década de 60. Este fato é devido principalmente à grande potencialidade mineral da laterita (Fe, Al, Au, Ti, Nb, etc.) e, também, por ser o material geológico que geralmente está aflorando (COSTA, 1991). Diversos autores já estudaram as lateritas da Amazônia (TOWSE; 1959; SOMBROEK, 1966; COSTA, 1985, 1988a, 1988b, 1990a, 1990b).

<sup>22</sup> SANTANA, H.; GONTIJO, P. R. A. Os materiais lateríticos na pavimentação de baixo custo no Brasil. Associação Brasileira de Pavimentação – **ABPv**, 22<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação. Maceió, Alagoas, Brasil. 1987.

Pelo fato das lateritas cobrirem aproximadamente 65% do território brasileiro (Melfi, 1997), torna-se de grande importância o desenvolvimento de metodologias, tanto na prospecção de novos depósitos e na identificação de minas abandonadas que devem ser recuperadas, como no aproveitamento de tais minerais para fins diversos.

Com o exame de mapas geológicos e pedológicos disponíveis, é possível prever a potencialidade da ocorrência de laterita em áreas fora da Região Amazônica, tais como nos Estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Bahia, entre outros (NOGAMI e colaboradores, 2000). A Figura 15 ilustra áreas de solos lateríticos arenosos e argilosos. Mesmo nas áreas em amarelo, ocorrem pequenas áreas de solo laterítico.



**Figura 15: Ocorrência de solos lateríticos no território brasileiro.**  
**Fonte: Nogami e colaboradores (2000).**

Nas áreas de solos lateríticos ocorrem jazidas promissoras para execução de bases de pavimentos ou mesmo para a confecção de concretos estruturais, embora neste último caso, a ocorrência de concretos executados com laterita ainda é ínfima. O emprego da laterita em pavimentos e, mais recentemente, em concretos a base de cimento Portland, compondo a fase agregado, só é possível após o material passar por processos de lavra e beneficiamento (OLIVEIRA, 2000).

A fim de viabilizar economicamente as rodovias secundárias (ou coletoras), buscase a redução dos custos de construção, através da adequação destas às condições regionais; seja com a melhoria de caminhos já traçados, do ponto de vista geométrico, de

maneira a reduzir os volumes de corte e aterro; seja com a utilização de materiais locais na execução da estrutura do pavimento (OLIVEIRA, 2000). O emprego de materiais regionais, mais econômicos, pode tornar possível a pavimentação de muitas rodovias, proporcionando a evolução econômica e integração a muitas áreas rurais hoje necessitadas de desenvolvimento.

Entre os materiais já utilizados ou com potencialidade de uso para pavimentação de rodovias com baixo volume de tráfego, destacam-se, o saibro de granito ou gnaisse<sup>23</sup>, o basalto alterado<sup>24</sup> e a laterita (OLIVEIRA, 2000). O solo laterítico como base de pavimentos pode ser usado tanto *in natura* como artificial, ou seja, com material obtido por mistura. Neste último caso, dois tipos de misturas podem ser efetuados: em caso de ocorrência de solos argilosos lateríticos nas proximidades da obra, estes devem ser corrigidos com a adição de areia laterítica quartzosa e/ou areia lavada de rio; se houver ocorrência de areia laterítica, a ela deverá ser adicionado solo argiloso laterítico.

Até o momento, a utilização de solos lateríticos em misturas a base de cimento é limitada devido à falta de conhecimento científico a respeito de seu comportamento. Por outro lado, a ausência da pedra britada em determinadas regiões, onera muito o custo das construções, devido à distância de transporte. Assim, a utilização das lateritas para confecção de concreto armado, passa a ser uma alternativa de enorme aplicação prática, tanto para essas regiões como para as de outros continentes carentes de agregados.

Estudos experimentais mostram que concretos estruturais confeccionados com agregados lateríticos (jazida Jacumã – Campina Grande/PB), 1% de superplastificante e 10% de sílica ativa, no traço 1:3,5, com consumo de cimento de 487,8 kg/m<sup>3</sup>, apresentaram resistência à compressão simples ( $f_c$ ) aos 28 dias de idade igual a 46,2 MPa, e sem o uso de adições o valor de  $f_c$  foi de 38 MPa. As resistências à tração foram da ordem de 1/10 da resistência à compressão e os módulos de elasticidade foram da ordem de 32 GPa. Após processo de cura térmica, o traço de concreto 1:5, com consumo de cimento de 365,7 kg/m<sup>3</sup>, o valor de  $f_c$  foi de 46,7 MPa. Quanto aos critérios de durabilidade (ABNT NBR 6118:2007), os concretos lateríticos atenderam as prescrições normativas (CHAGAS FILHO, 2005).

O bom desempenho do concreto laterítico, revela que é possível produzir concretos com concreções lateríticas como agregado graúdo com resistências da ordem de 40 MPa aos 28 dias de idade, e de ótimo desempenho frente aos graus de agressividades

---

<sup>23</sup> Solo residual de textura grossa e com ocorrência no Escudo Rio-Grandense – RS.

<sup>24</sup> Agregado resultante do processo de alteração (esfoliação esferoidal) de rochas vulcânicas, com grande fendilhamento. Ocorre em quase toda a região do derrame vulcânico do RS, abrangendo a metade norte do estado.

ambientais, baseado no atendimento dos limites da ABNT NBR 6118:2007 (CHAGAS FILHO, 2005 apud SOUZA, 2007).

A incorporação de adições minerais, como o metacaulim, nos concretos lateríticos faz com que suas características mecânicas sejam compatíveis com os concretos dosados com agregados tradicionais. O concreto laterítico dosado com 2% de aditivo plastificante e 10% de metacaulim em substituição ao cimento, na proporção 1: 1,45:2,35:0,40 em massa, atingiu resistência à compressão de 36,1 MPa aos 28 dias de idade e módulo de elasticidade de 33,6 GPa, além de apresentar comportamento similar ao dos concretos convencionais, com brita ou seixo rolado (OLIVEIRA e colaboradores, 2011).

Apesar do quadro promissor para a laterita, em momento algum devem ser desconsideradas suas características e seu comportamento quando adicionada ao concreto. Por exemplo, as lateritas podem apresentar algumas substâncias nocivas, tais como películas de argilas que cobrem as partículas minerais e também torrões de argila que freqüentemente surgem nestes agregados. Essas substâncias, segundo Azevedo (1983), constituem fatores que incidem desfavoravelmente sobre a aderência dos grãos de laterita com a matriz de cimento e, conseqüentemente, sobre a resistência do concreto aos esforços mecânicos.

Em contrapartida, a textura alveolar da laterita faz com que seja absorvida maior quantidade de água de amassamento durante a mistura do concreto, conduzindo a maior perda de trabalhabilidade em relação aos concretos de agregados naturais. Este aumento na absorção é utilizado por alguns autores para justificar o processo intitulado de “cura interna”, no qual se afirma que a água absorvida pelos agregados durante a fase de mistura irá ajudar na hidratação do cimento no entorno do agregado, aumentando assim a resistência da pasta nesta zona de interface.

Com base no exposto acima e levando em consideração o contexto vivenciado por diversas regiões brasileiras, especialmente as Norte e Nordeste, julga-se interessante e pertinente o estudo de concretos estruturais confeccionados com agregados alternativos, como a laterita e o seixo rolado, avaliando-se o desempenho destes concretos após aplicação da técnica de dopagem de agregados aqui proposta.

## **3. CONCRETO ESTRUTURAL**

---

---

Segundo Liborio (2003), o material concreto armado não é apenas uma simples associação de cimento Portland, agregados miúdo e graúdo, água de amassamento e armadura de reforço. Ele deve ser entendido como um material contendo pelo menos cinco fases: a pasta de aglomerantes, os agregados miúdo e graúdo, a zona de transição, os vazios e a armadura de reforço; em que cada uma tem sua importância no produto final e, assim sendo, se não houver a sinergia entre os materiais, dificilmente se poderá ter um concreto durável e a possibilidade de confiabilidade numa estrutura.

O concreto assim estabelecido pode conter um ou mais materiais que proporcionam o realce de um ou mais parâmetros, até atender às necessidades de projeto. E, acima de tudo, ele deve ser exeqüível.

Neste estudo, são valorizadas a escolha e a sinergia dos seguintes materiais: cimento Portland, sílica ativa, aditivos e agregados, e abordada a influência destes materiais no comportamento da zona de transição entre a pasta de aglomerantes e o agregado graúdo, já que o interesse está em avaliar como a técnica de dopagem pode melhorar o desempenho desta ligação e alterar a estrutura de poros, tipo e morfologia dos produtos de hidratação do cimento nesta região.

### **3.1. Pasta de aglomerantes**

#### **3.1.1. Cimento Portland**

Quando se vai produzir uma pasta, especialmente de alto desempenho, a primeira escolha a ser feita é quanto ao tipo de cimento a ser empregado, mesmo quando um ou mais materiais cimentícios suplementares são incorporados à mistura. Isto porque seu desempenho em termos de reologia e de resistência torna-se um item crítico à medida que a resistência à compressão aumenta (AÏTCIN, 2000). Associadas ao tipo de cimento, as propriedades do concreto dependem da composição química do cimento, da finura, da distribuição granulométrica e da evolução do processo de hidratação.

A composição química do cimento interfere tanto na velocidade de hidratação quanto na resistência final. O clínquer é constituído tipicamente por óxido básico (67% de CaO) e óxidos ácidos (22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e outros componentes, em torno de 3%. Esses compostos reagem quimicamente, sendo que mais de 90% resultam em duas fases de silicatos bem cristalinos (C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S) e uma fase intersticial composta por C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, além de algumas poucas impurezas (periclásio - MgO, óxido de cálcio calcinado endurecido - CaO e sulfatos alcalinos). Estes compostos não possuem estrutura cristalina pura, possuindo defeitos devido à presença de impurezas (ex: Mg, Al, Fe, Si, Na, K e S). Estes defeitos, presentes em maior ou menor grau, levam a estruturas com maiores ou menores vazios estruturais, tornando-os mais ou menos reativos. Os aluminatos possuem estruturas complexas caracterizadas por grandes vazios estruturais, responsáveis pela elevada reatividade dos compostos. Já o C<sub>2</sub>S forma cristais maiores e com menos falhas, sendo menos reativo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A ordem de reatividade dos compostos do clínquer é aproximadamente a seguinte: C<sub>3</sub>A > C<sub>3</sub>S > C<sub>4</sub>AF > C<sub>2</sub>S e o calor de hidratação típico das fases (C<sub>3</sub>A=320cal/g; C<sub>3</sub>S=120cal/g; C<sub>4</sub>AF=100cal/g; C<sub>2</sub>S=60cal/g) também confirma a reatividade característica de cada uma delas (Melo, 2000). Assim, a resistência em idades mais baixas está relacionada principalmente ao C<sub>3</sub>S e C<sub>3</sub>A e a idades altas com o C<sub>2</sub>S. Além do que, cimentos com altos teores de C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF irão se hidratar muito mais rapidamente que cimentos contendo C<sub>3</sub>S ou C<sub>2</sub>S. Na Tabela 2 estão resumidas as propriedades dos principais componentes do cimento (LIBORIO, 1999).

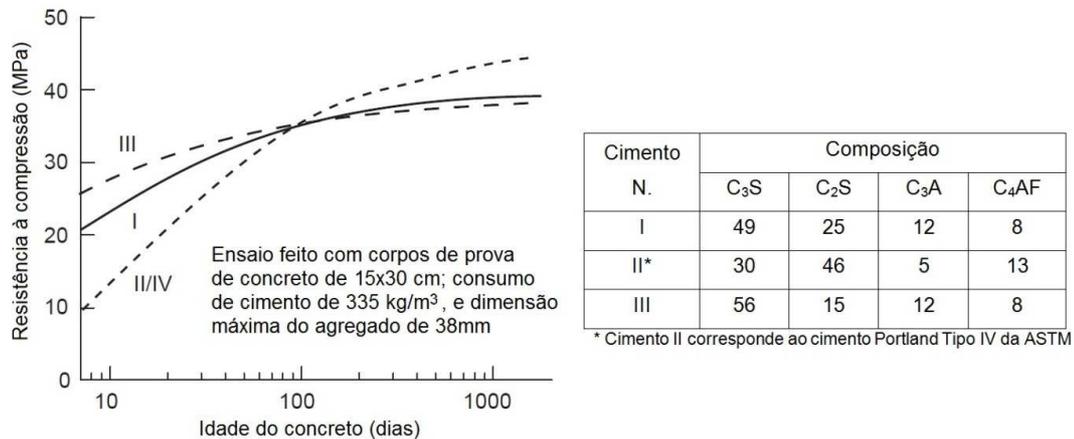
**Tabela 2: Propriedades dos quatro principais componentes do cimento.**

Propriedade	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Resistência em pequenas idades	Boa	Fraca	Boa	Fraca
Resistência em idades posteriores	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Velocidade de reação com a água (hidratação)	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Quantidade de calor gerado na hidratação	Média	Pequena	Grande	Média
Resistência a águas agressivas	Média	Boa	Fraca	Fraca

**Fonte: Liborio (1999)**

Os cálculos estequiométricos da hidratação química dos silicatos mostram que o C<sub>3</sub>S produz 61% de silicato de C-S-H e 39% de CH. Por outro lado, a hidratação do C<sub>2</sub>S gera 82% de C-S-H e 18% de CH. Assim, como a propriedade adesiva (resistência mecânica) da pasta de cimento é principalmente devido à formação de C-S-H, espera-se que a resistência mecânica final de um cimento Portland com alto teor de C<sub>3</sub>S seja menor do que a de um cimento com alto teor de C<sub>2</sub>S (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Essa análise

teórica é também confirmada pelos autores por meio de comparação de resistências obtidas com concretos elaborados em tipos diferentes de cimento, que possuem diferentes composições em termos de  $C_3S$  e  $C_2S$  principalmente, conforme é ilustrado na Figura 16.



**Figura 16: Influência do tipo de cimento na resistência.**  
**Fonte: adaptada de Mehta; Monteiro (2008).**

Com relação à durabilidade de pastas de cimento sob a ação de águas ácidas e sulfáticas, pode-se dizer que esta é reduzida devido à presença de CH; portanto, espera-se que um cimento contendo um maior teor de  $C_2S$  seja mais durável em ambiente ácidos e sulfatados do que outros com maiores teores de  $C_3S$ . Para a durabilidade frente a ataques químicos, existem muitas especificações que limitam o teor máximo permissível de  $C_3S$  nos cimentos; outras recomendam o uso de pozolanas para remover o excesso de CH da pasta de cimento hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Considerando então a composição do cimento, Aïtcin (2000) e Neville (1997) comentam que o cimento mais adequado para a produção do concreto de elevado desempenho seria um cimento com baixo teor de  $C_3A$  e com a reatividade da fase intersticial facilmente controlada por íons sulfatos, estes sendo derivados da dissolução de sulfatos presentes no cimento. Tal argumento se fundamenta no fato de que, no caso do concreto de alto desempenho, o problema da compatibilidade cimento-aditivo é muito mais significativo do que no concreto convencional. Assim, o teor de  $C_3A$ , de  $C_4AF$ , o sulfato de cálcio no cimento e a presença de materiais carbonáticos irão afetar as características flocculantes do cimento, bem como inibir o comportamento dos aditivos.

Além da composição química do cimento, sua finura e distribuição granulométrica são muito importantes para o comportamento reológico e para o desenvolvimento do desempenho mecânico do concreto. Kihara e Centurione (2005) afirmam que a velocidade

com que se chega à resistência final de um cimento totalmente hidratado está diretamente ligada à sua finura, embora esta resistência independa da finura original. Cimentos mais finos desenvolvem maiores resistências a menores idades. Cimentos mais grossos, além de possuírem hidratação mais lenta, podem apresentar parte das partículas que jamais hidratam, mesmo em idades muito avançadas.

Quanto à distribuição granulométrica, Kihara e Centurione (2005) consideram como ideal uma faixa entre 3 e 30  $\mu\text{m}$ . Para os autores, partículas abaixo de 2  $\mu\text{m}$  pouco influenciam no aumento de resistência, contribuindo mais expressivamente para o aumento do consumo de água para a mesma trabalhabilidade; justificativa para o limite inferior adotado.

Taylor (1992) faz relação entre o tempo e a profundidade de hidratação de partículas de cimento. Sob condições normais de cura, partículas de dimensão entre 0,43 $\mu\text{m}$  a 0,47 $\mu\text{m}$  reagem em 1 dia; entre 1,7 $\mu$  a 2,6 $\mu\text{m}$  em 7 dias; entre 3,5 $\mu$  a 5,4 $\mu\text{m}$  em 28 dias; e entre 6,1 $\mu$  a 8,9 $\mu\text{m}$  podem levar até 150 dias para reagirem. É muito difícil ocorrer a hidratação de partículas de cimento superiores a 45 $\mu\text{m}$ , e aquelas superiores a 75 $\mu\text{m}$  nunca se hidratam. O autor afirma também que em relações a/c abaixo de 0,38 a hidratação completa do cimento não ocorre; problemática observada nos concretos de alto desempenho onde a relação a/c é baixa.

É importante entender como o grão de cimento se hidrata uma vez que será com base neste mecanismo de hidratação que o processo de impregnação dos agregados graúdos ocorrerá e, portanto, fará parte da metodologia de aplicação da técnica de dopagem dos materiais aqui proposta.

A hidratação do cimento Portland evolui com o tempo, tendo aos 28 dias de cura cerca de 70% a 80% de grau de hidratação e praticamente se completando aos 365 dias (SCRIVENER; NONAT, 2011). É um processo que se dá, inicialmente, por dissolução-precipitação e, posteriormente, por um processo denominado topoquímico. No estágio inicial, os compostos anidros do cimento são dissolvidos, formando hidratos na solução. Devido à baixa solubilidade desses hidratos, a solução torna-se supersaturada, levando à precipitação de compostos hidratados. Em geral, sua duração corresponde a 30% da hidratação, entre 3 e 24 horas. No estágio posterior, ocorrem as reações topoquímicas, que se iniciam na superfície da partícula e prosseguem gradativamente de fora para dentro, sendo consideradas reações de hidratação no estado sólido. Esta etapa independe da temperatura de cura.

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo (várias reações de hidratação de cada composto do clínquer ocorrem simultaneamente, em diferentes

velocidades, interferindo umas nas outras) e com reações exotérmicas (grande liberação de calor principalmente no período denominado de pega, que dura, em geral, de 4 a 8 horas, e se caracteriza pela produção acelerada de produtos hidratados e por um máximo de liberação de calor próximo ao seu fim). A Figura 17 mostra a curva típica de desenvolvimento de calor para o cimento Portland comum.



**Figura 17: Representação esquemática da hidratação do cimento Portland comum, baseada na taxa de liberação de calor.**  
**Fonte: adaptada de Zampiere (1989).**

O estágio inicial corresponde ao início da hidratação e dura cerca de 10 minutos. Neste estágio, há grande liberação de calor e formação de bastões pequenos e grossos de AFt (250nm X 100nm) próximos à superfície dos grãos do clínquer, além do início da nucleação e do crescimento dos produtos CH e C-S-H. Durante as próximas 3 horas, correspondentes ao período de indução, as reações são controladas quimicamente por dissolução-precipitação, há a formação de camadas externa e interna de C-S-H sobre a superfície dos grãos anidros e início da cristalização do CH no final do período de indução. Durante o período de aceleração, que dura de 3 a 24 horas, há a precipitação contínua e rápida de C-S-H e de outros produtos hidratados, e o desenvolvimento de um esqueleto contínuo de produto hidratado, formado a partir de contatos entre os grãos anidros e o CH (na forma de plaquetas finas) e o C-S-H. O início de pega se dá no começo deste período e ao final dele, crescem novamente os cristais aciculares de AFt (com dimensões de 2,0µm até 10,0µm de comprimento) e ocorre o fim da pega, iniciando-se a fase de endurecimento (CAMARINI, 1995; GARTNER; GAIDIS, 1989; JAWED; SKALNY; YOUNG, 1983; SCRIVENER, 1988; TAYLOR, 1992).

Observa-se que, se o agregado dopado for misturado aos demais materiais constituintes do concreto no final do período de aceleração, já existirão esqueletos contínuos de produto hidratado, podendo dificultar ou prejudicar de alguma forma a aderência química entre a camada de dopagem e a matriz do concreto e, assim, a técnica de dopagem tornar-se-ia ineficiente e inviável tecnicamente. Desta forma, para confeccionar os concretos dopados, é interessante e conveniente lançar os agregados dopados no misturador mecânico somente em um instante de tempo bem próximo ao início de pega da calda de impregnação. Com isso, garante-se que neste instante as reações ainda não se completaram, e, portanto não se comprometem outras futuras reações, e, ao mesmo tempo, as ligações não são tão fracas, a ponto de permitir que o material de impregnação seja removido do agregado após a mistura com os demais materiais do concreto.

O período de desaceleração dura de 1 dia a 3 dias e pode haver a formação de Afm, a partir da reação de AFt com o  $Al(OH)^4-$ , caso existam quantidades menores de sulfatos disponíveis na solução. O estágio final do processo de hidratação do cimento é caracterizado por reações cada vez mais lentas e contínuas por mecanismo topoquímico e parte do C-S-H formado anteriormente é envolvido por produtos hidratados como os CH (CAMARINI, 1995; GARTNER; GAIDIS, 1989; JAWED; SKALNY; YOUNG, 1983; SCRIVENER, 1988; TAYLOR, 1992).

Conhecendo os produtos formados durante a hidratação do cimento e suas quantidades – principalmente o C-S-H e o CH que correspondem a cerca de 80% do volume de sólidos de uma pasta de cimento – e associando-os com a resistência desenvolvida pelo sistema, é possível produzir concretos de alto desempenho.

O C-S-H representa de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 1994) e é o principal produto de hidratação responsável pelo desenvolvimento da resistência do concreto. A morfologia deste produto varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino, com área específica de  $100 \text{ m}^2/\text{g}$  a  $700 \text{ m}^2/\text{g}$ . Já o CH constitui cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, pouco contribui para a resistência e dissolve-se em presença de umidade, sendo quimicamente instável devido às baixas forças de Van der Waals. Porém, é ele que proporciona a alcalinidade da água presente nos poros do concreto e mantém a armadura passivada. Este composto apresenta uma morfologia bem definida em forma de prismas hexagonais, cujas dimensões aumentam com o espaço disponível para o seu desenvolvimento (DAL MOLIN, 1995). Além do espaço disponível, sua morfologia é afetada pela temperatura de hidratação e pela presença de impurezas.

Por isso, quando se quer produzir concretos de alto desempenho, é necessário que o cimento, ao se hidratar, desenvolva o máximo possível de C-S-H, que pode ser conseguido utilizando-se baixa relação  $a/agl$ , sem prejudicar a reologia do concreto fresco (AÏTCIN, 2000). O emprego de adições minerais e aditivos superplastificantes no concreto também contribui para o incremento de C-S-H e manutenção de sua trabalhabilidade.

### 3.1.2. Adições minerais

As principais adições minerais feitas ao clínquer, além dos sulfatos, são as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos (como a cinza de casca de arroz e a sílica ativa) e os materiais carbonáticos. Entre essas adições, foca-se o estudo na escória de alto-forno, presente no cimento CP-III 40 RS, e na sílica ativa de ferro-silício; materiais usados no estudo.

A incorporação da escória ao cimento, em teores variando de 35% a 70% da massa total do material aglomerante (ABNT NBR 5735:1991), limitaria a aplicação prática deste, caso agentes ativadores, químicos e físicos, não acelerassem o processo de hidratação. A cal liberada durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando esta é adicionada ao cimento, ao passo que a ativação física é conseguida pelo aumento da finura quando a escória é moída separada ou conjuntamente com o clínquer.

A ação dos ativadores assume papel fundamental por permitir que o pH da solução mantenha-se elevado, contribuindo para a continuação das reações. O cimento Portland é o ativador mais comum da escória, já que nele estão presentes vários ativadores, como sulfato, hidróxidos de cálcio e de sódio. Pelo fato do CH ser o segundo maior volume entre os produtos gerados na hidratação do cimento Portland, sua influência incide em propiciar elevado pH e, assim, permitir o prosseguimento das reações de hidratação da escória.

Ao comparar as reações de hidratação da escória granulada de alto-forno e do clínquer, as escórias apresentam menor velocidade de hidratação e liberam menos calor durante a reação. A partícula de escória ativada pelo cimento Portland mostra sinais de início de reação após 7 dias de hidratação e mesmo após 28 dias permanece incompleta, podendo ter um núcleo não hidratado (SARKAR e colaboradores, 1990). O estudo desenvolvido por Kocaba (2009) evidencia a hidratação da escória em tempos menores, sendo apresentados casos em que com 7 dias já se tem 40% de hidratação, evoluindo para 50% aos 28 dias, a depender da composição da escória e da mistura cimentícia avaliadas.

Já está bem estabelecido na literatura que os cimentos contendo escória de alto forno, pelo fato de terem menor quantidade de clínquer, ao se hidratarem, produzem menor quantidade de CH. Da mesma forma, esses cimentos apresentam menor resistência a pequenas idades, o que é atribuído ao menor crescimento do gel de C-S-H (SILVA, 2000).

O composto comum formado para qualquer tipo de ativador da escória é sempre o C-S-H. A consequência da formação desse composto (C-S-H), produzido pela hidratação da escória, é o preenchimento dos espaços vazios, aglutinação de outras fases cristalinas hidratadas e adesão muito boa à escória anidra e ao agregado (GLASSER, 1991), contribuindo bastante para o melhor desempenho mecânico das matrizes de cimento Portland com escória. Conseqüentemente, a adição de escória modifica a microestrutura do concreto, diminuindo sua permeabilidade, sua difusibilidade iônica e sua porosidade capilar e aumentando sua estabilidade e durabilidade. Tais fatores repercutem diretamente no comportamento do concreto, melhorando seu desempenho ante a ação de sulfatos e da reação álcali-agregado. Outras propriedades são também alteradas, incluindo a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência à compressão em idades avançadas, a melhor trabalhabilidade e outros. Frente a tais benefícios, neste estudo é importante considerar o uso do cimento C-III 40 RS justamente pela presença da escória de alto-forno.

Ao estudar o desenvolvimento da microestrutura de concretos de cimento Portland, sob influência da cura térmica a vapor, Melo (2000) concluiu que o C-S-H gerado em matrizes de cimento Portland compostas com apenas 30% de escória foi eficiente para o refinamento dos poros e que a hidratação do sistema composto entre cimento Portland, 30% de escória (substituição à massa de cimento) e 10% de sílica ativa (adição à massa de cimento) quando acelerada pela elevação da temperatura ( $T_{\text{máx}}=61^{\circ}\text{C}$ ) e por longos períodos (cerca de 12 horas) produz o enfraquecimento da interface pasta/agregado, reduzindo o desempenho mecânico do concreto nas idades mais avançadas.

Vale ressaltar que o C-S-H produzido na hidratação dos aglomerantes hidráulicos, em presença de escória de alto-forno, é diferenciado pela relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , segundo a origem, cujo valor diminui na ordem: cimento Portland > escória de alto-forno > pozolana (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A composição deste C-S-H diferencia-se não somente devido à menor relação  $\text{Ca}/\text{Si}$ , mas também pelo elevado teor de álcalis (WU e colaboradores, 1983). A análise elementar por EDS também mostra que o novo C-S-H, formado através da hidratação da partícula de escória, é mais rico em "Mg" e "Al" e é menos cálcico em relação ao C-S-H formado pelo clínquer (Glasser, 1991; Richardson e Groves, 1992). Além disso, sua morfologia também é modificada, tendo o aspecto de folhas finas (SILVA, 2004).

Com relação à sílica ativa, os efeitos benéficos desta adição ao concreto estão associados as suas propriedades físicas e químicas, tais como área específica, granulometria e sinergia da sílica com outros aditivos.

A área específica da sílica ativa varia de 13.000 m<sup>2</sup>/kg a 30.000 m<sup>2</sup>/kg (medida pelo método BET), ficando a média em torno de 20.000 m<sup>2</sup>/kg, bastante superior à do cimento Portland (350 m<sup>2</sup>/kg a 600 m<sup>2</sup>/kg) e a da escória (400 m<sup>2</sup>/kg e 500 m<sup>2</sup>/kg). Já em termos de massa específica, o valor médio para a sílica de Fe-Si varia entre 2150 kg/m<sup>3</sup> e 2650 kg/m<sup>3</sup>.

A distribuição dos tamanhos das partículas de uma sílica ativa típica apresenta a maior parte com diâmetro menor que 1µm e com um diâmetro médio de 0,1µm a 0,2µm, sendo aproximadamente duas ordens de magnitude mais finas que as partículas de cimento Portland, ou seja, com diâmetros cerca de 100 vezes mais finos que os diâmetros médios das partículas de cimento (Dal Molin, 2005). As partículas finas de sílica ativa fazem com que o material seja altamente pozolânico, entretanto esta característica leva a um aumento considerável no consumo de água do concreto, quando não é feita qualquer adição de aditivos redutores de água.

Quanto maior a área específica e menor a granulometria, maior a eficiência da ação da sílica. Se a sílica amorfa for uniformemente misturada ao cimento, obtém-se o melhor desempenho das propriedades dos concretos produzidos com essa combinação. Por outro lado, quando as partículas de sílica estão agregadas, a sua eficiência diminui (LIBORIO e colaboradores, 1998).

A sílica ativa produz efeitos químicos e físicos na microestrutura do concreto. Ao contrário das escórias, a reação CH – SiO<sub>2</sub> envolvendo a sílica ativa é rápida, não sendo necessários longos períodos de cura para atingir as resistências ou baixas permeabilidades desejadas. De acordo com Mehta e Arincin (1990), as partículas pequenas de sílica ativa quando dispersadas na pasta, geram um grande número de nucleações locais para a precipitação dos produtos da hidratação. Conseqüentemente, este mecanismo torna a pasta mais homogênea e densa, com uma distribuição de poros mais refinada, por causa de reações pozolânicas e do efeito físico dos grãos de sílica.

O efeito químico ou pozolânico ocorre com a reação química entre CH, elemento frágil gerado durante a hidratação do cimento Portland, e as partículas de adição, produzindo um composto bem mais resistente e bem menos solúvel, o C-S-H, morfologicamente diferente do C-S-H produzido durante a hidratação do cimento. O incremento de C-S-H conseguido através da introdução de sílica ativa é chamado de efeito pozolânico. Esse adicional C-S-H produzido pela sílica é mais resistente ao ataque de agentes agressivos, o que aumenta a resistência química do concreto. Além disso, a zona

de transição na interface entre a pasta e o agregado, considerada o elo mais fraco do concreto, diminui resultando em aumento das resistências à compressão (SCRIVENER, 2004; PEREIRA, 2010).

Os diferentes tipos de C-S-H formados na presença da sílica ativa podem ser vistos na Figura 18, encontrados na interface entre o chapisco aditivado e a pasta de cimento (SILVA, 2004).

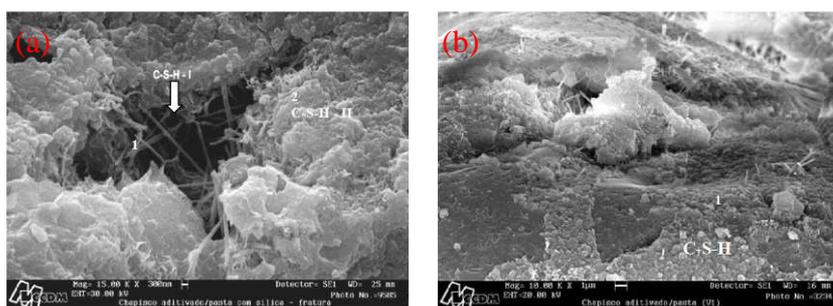


Figura 18: Formação do C-S-H em pastas com sílica: (a) tipos I e II e (b) tipo III. Fonte: Silva (2004).

O C-S-H tipo I é encontrado principalmente nas primeiras idades e cresce nos vazios capilares e é formado por partículas que se lançam para fora dos grãos de cimento e apresentam-se na forma de partículas fibrosas, espinhos ou agulhas. O C-S-H tipo II ocorre em conjunto com o C-S-H tipo I e sua estrutura é conhecida como reticular ou favo de mel. Já o C-S-H tipo III é uma massa compacta e homogênea, com morfologia difícil de ser definida, bem comum nas pastas de cimento endurecidas e parece constituir uma boa parcela dos produtos hidratados totais (TAYLOR, 1997). Pelo fato da sílica ativa ser usada somente na calda de impregnação do agregado graúdo, provavelmente as fotomicrografias obtidas neste estudo mostrarão tipos de C-S-H na zona de transição diferentes daqueles presentes na matriz do concreto, e, por isso, a importância de saber identificá-los.

Quando a quantidade de sílica ativa é superior àquela que reage com todo o hidróxido de cálcio disponível, este excesso de sílica contribui para a diminuição da porosidade da pasta endurecida, exercendo a mesma função do cimento anidro e fíler. É o efeito fíler da sílica ativa.

O efeito físico ou fíler acontece como resultado do tamanho das partículas de sílica ativa, que se introduzem entre os grãos de cimento e se alojam nos interstícios da pasta, reduzindo o espaço disponível para a água (diminuição do efeito parede) e atuando como ponto de nucleação, o que dificulta a orientação preferencial dos cristais de CH na interface

pasta/agregado (SILVA, 2000). Esta zona mais fraca é reforçada devido à ligação mais elevada entre estas duas fases, melhorando a microestrutura e as propriedades do concreto. Por consequência, devido à redução do número e tamanho dos capilares que poderiam exercer influência na contaminação e deterioração do concreto, a sílica ativa contribui não apenas para torná-lo mecanicamente mais resistente, mas também torná-lo quimicamente mais resistente à agressividade do meio ambiente quando comparado à pasta convencional. É justamente por causa deste reforço da interface que se empregou a sílica ativa nas caldas de impregnação.

Segundo Melo (2000), a microestrutura de pastas de cimento contendo sílica ativa, em comparação à pasta de cimento Portland sem adições, indica que a sílica ativa é efetiva na redução do tamanho e continuidade dos poros. Dessa forma, a combinação de cimento Portland com sílica ativa resulta em uma matriz mais densa e de baixa porosidade.

Na Figura 19 apresenta-se o resultado de porosidade de pastas de cimento CPV ARI-RS, com e sem sílica ativa, em trabalho realizado por SILVA (2000). O autor também observou que a adição de 10% de sílica ativa de ferro-silício melhora a qualidade da matriz e refina a estrutura porosa do concreto, melhorando assim suas propriedades mecânicas e sua durabilidade.

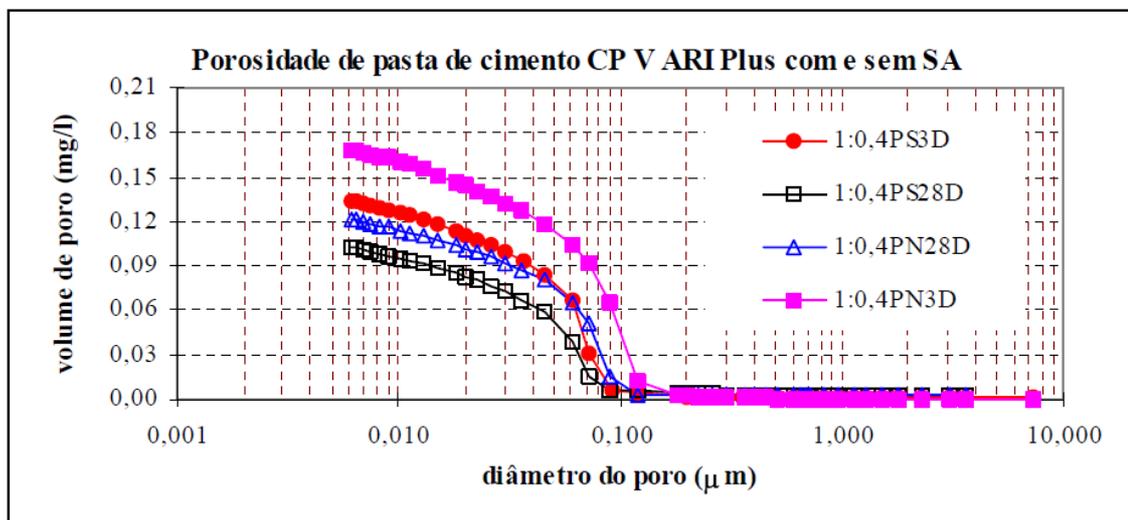
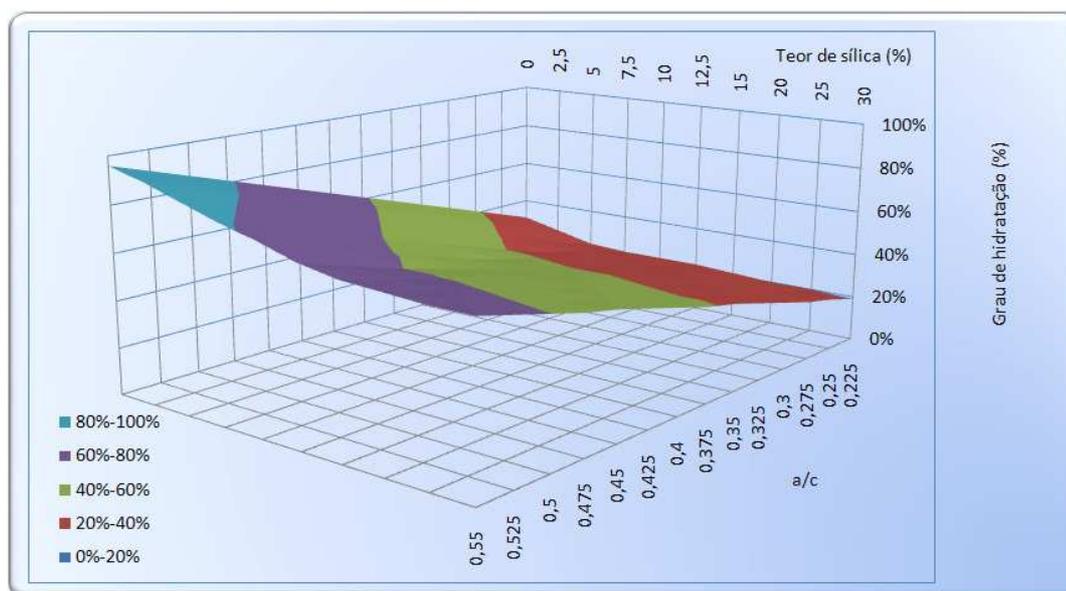


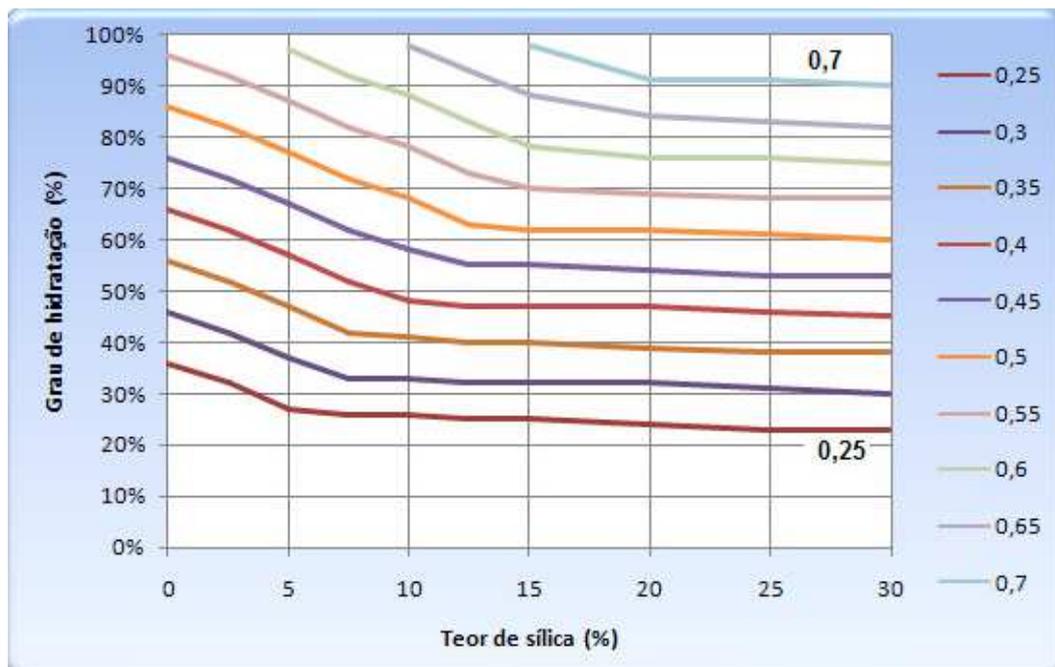
Figura 19: Resultado de porosidade obtido por intrusão de mercúrio para pastas de cimento CPV ARI, com (PS) e sem (PN) sílica ativa, aos 3 e 28 dias de idade e relação a/agl = 0,5. Fonte: Silva (2000).

Levando-se em conta as considerações de Bentz e Garboczi (1991), é possível construir uma superfície (Figura 20) que relaciona o grau de hidratação para desconectar os poros com a relação  $a/c$  e o teor de substituição em massa de sílica em relação ao cimento (PEREIRA, 2010). Observa-se que ao diminuir a relação  $a/c$ , há necessidade de menos produtos de hidratação para atingir a condição estabelecida.



**Figura 20: Variação do grau de hidratação do cimento necessário para atingir a desconexão dos poros em função da relação  $a/c$  e do teor de sílica ativa.**  
Fonte: Pereira (2010).

A superfície, se seccionada, em qualquer relação  $a/c$ , Figura 21 gera uma curva bi-linear, indicando que a adição de sílica, para atingir a porosidade crítica teórica de 18% (desconexão de poros), tem um teor ótimo para cada relação  $a/c$ . Por exemplo, para a relação  $a/c$  igual a 0,50, a substituição de 12% da massa de cimento por sílica seria mais indicada para esse objetivo. À medida que a relação  $a/c$  aumenta há mais necessidade de consumir sílica ativa para diminuir a porosidade capilar.



**Figura 21: Variação do grau de hidratação do cimento necessário para atingir a desconexão dos poros em função do teor de sílica ativa para várias relações a/c.**  
**Fonte: Pereira (2010).**

O efeito da sílica ativa no desenvolvimento da resistência à compressão da pasta, argamassa ou concreto pode ser expresso por um fator de eficiência  $K$ . Isaia (1995) denominou como índice de resistência a relação entre a resistência do traço com sílica ativa e a do traço de referência para igual relação  $a/agl$  e concluiu que a eficiência da sílica ativa é muito tênue, apesar de apresentar resistência acima da referência para teores de 10% de sílica ativa. Para teores mais elevados de sílica ativa (15% a 20% SA), as tendências mantiveram-se as mesmas: em um nível mais alto, cerca de 1,3 a 1,4. Ou seja, mesmo com grandes teores, a eficiência da sílica ativa, quando comparada ao teor de 10%, não foi tão promissora no que se refere à resistência à compressão.

A quantidade de sílica ativa adicionada é, portanto, um parâmetro importante que influencia a resistência à compressão dos concretos. Para construções convencionais, a dosagem ótima varia, geralmente, entre 7% e 10%, chegando, em situações especiais, a 15%. Mehta e Monteiro (1994) indicam que os ganhos efetivos de resistência à compressão ou à tração ocorrem para teores de sílica na faixa de 8% a 12%.

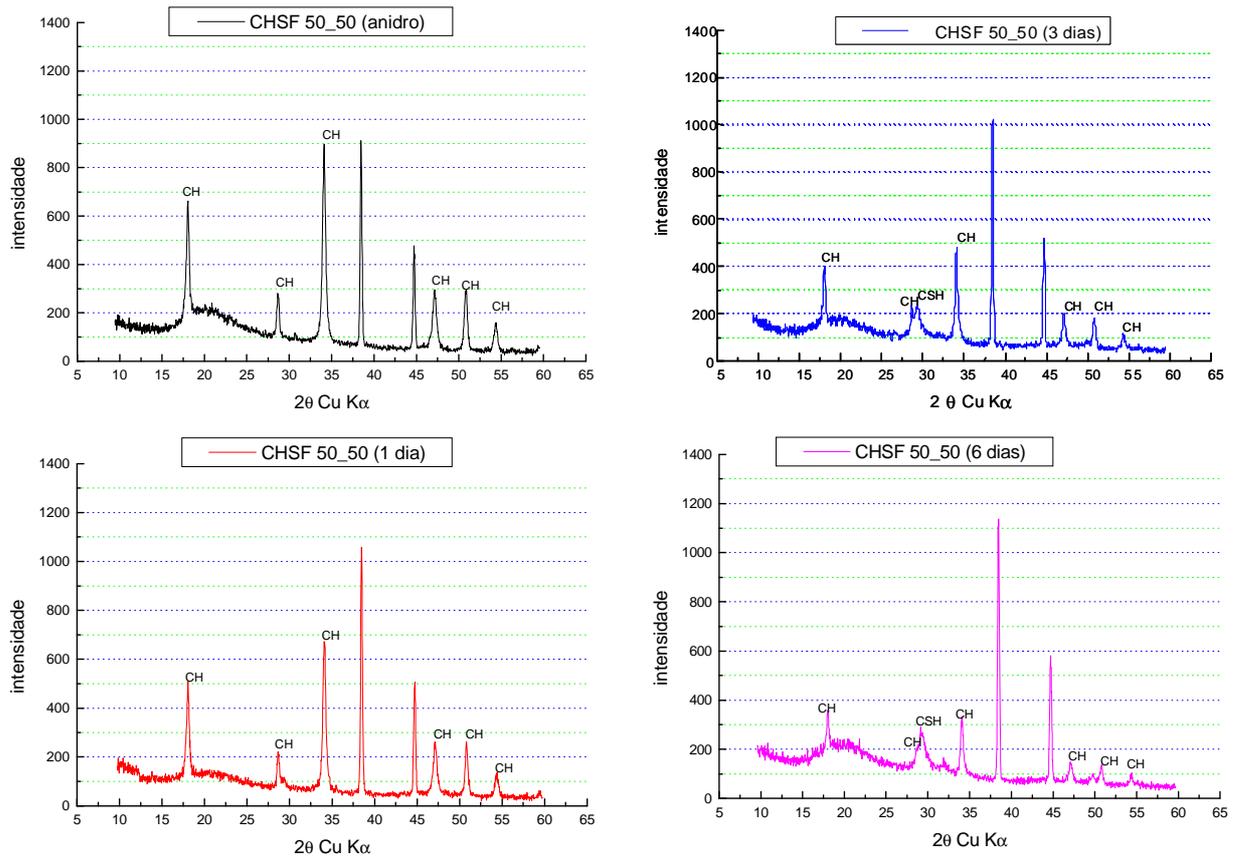
A adição de maiores teores de sílica ativa gera controvérsias quanto às melhorias proporcionadas ao concreto. O concreto denominado de LHHPC (*Low-heat high performance concrete*)<sup>25</sup>, que teve baixo consumo de cimento Portland e alto consumo de material pozolânico, resultou em um pH da água do poro muito baixo, 9,65, o que suscitou dúvidas quanto ao desempenho desse material para utilização em concreto armado (PEREIRA, 2010). Entretanto, a adição de 20% a 30% de sílica ativa, por exemplo, tem potencial para refinar ainda mais a porosidade e produzir mais silicatos de cálcio hidratados, além de possibilitar o consumo total de CH da mistura.

A possibilidade de consumir toda a quantidade de hidróxido de cálcio por meio da reação pozolânica com a sílica ativa foi verificada por LIBORIO (2002) em estudo experimental, em que foram produzidas soluções saturadas contendo diferentes proporções de CH padrão PA e sílica ativa de Fe-Si. A saturação da solução foi importante para garantir a completa hidratação do sistema. As amostras foram analisadas por meio do ensaio de difração de raios-X, em situação anidra e com 1, 3 e 6 dias de idade.

A análise por difração de raios-X foi feita a partir dos picos exibidos nos difratogramas (característicos para cada tipo de substância – ou fase), sendo em seguida identificados. Através da análise em condição hidratada foram observadas as alterações significativas ocorridas nos produtos de hidratação das misturas, permitindo-se acompanhar o comportamento do CH. Com auxílio de listagem baseada na literatura “International Centre For Diffraction Data” - (ICDD), contendo o ângulo, a distância interplanar com respectiva intensidade dos picos e intensidades relativas para várias substâncias, foram identificadas as fases presentes em cada amostra. As amostras foram preparadas utilizando-se fragmentos destas amostras, que foram moídos em almofariz cerâmico (para proporcionar grãos passantes, pelo menos, na peneira # 0,075mm) e mantidos em estufa à 60°C, por um período de no mínimo 12 horas, sendo então colocados no porta amostra do equipamento de raios-X (LIBORIO, 2002). A Figura 22 apresenta os resultados da mistura contendo 50% de CH e 50% de sílica ativa.

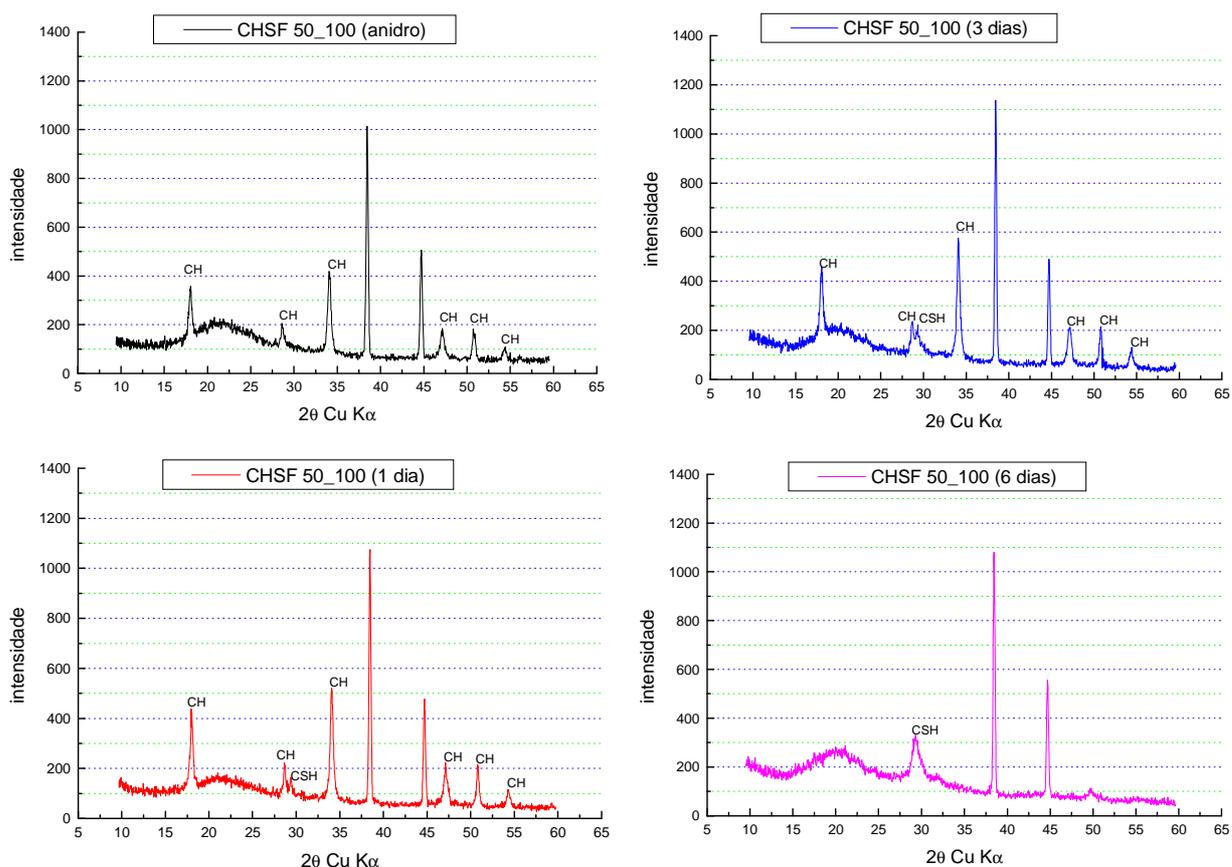
---

<sup>25</sup> BRETON, DANNYS. *Low-heat high performance concrete*. US005531823A United States of America, 02 de Jul de 1996. ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED. Disponível em [www.freepatentsonline.com/5531823](http://www.freepatentsonline.com/5531823). Acesso em 18/09/2010.



**Figura 22: Difratoograma para amostra com 50% de CH e 50% de sílica de Fe-Si.**  
**Fonte: Liborio (2002).**

Os resultados permitem concluir que ao misturar 50% de CH e 50% de sílica ativa a raia relativa ao CH diminui com o passar do tempo, embora não tenha desaparecido totalmente até os 6 dias de idade, e começa a surgir a partir do primeiro dia uma raia (representada pelo “halo” amorfo  $28^\circ$  e  $34^\circ$   $2\theta$ ) relativa ao C-S-H, que vai aumentando com o tempo. Ao misturar 50% de CH e 100% de sílica ativa a quantidade de hidróxido é consumida completamente pela sílica, logo aos 6 dias de idade (Figura 23). Além da diminuição da raia de CH e aumento da raia de C-S-H, comum em ambas as misturas, observa-se que aos 6 dias de idade esta proporção de mistura produziu mais C-S-H que a proporção anterior (LIBORIO, 2002). A partir destes resultados comprova-se a importância de utilizar teores maiores de sílica ativa nas misturas cimentícias, caso queira-se o total consumo de CH.



**Figura 23: Difratoograma para amostra com 50% de CH e 100% de sílica de Fe-Si.  
Fonte: Liborio (2002).**

É unânime que a incorporação de sílica ativa em CADs causa uma melhora considerável na microestrutura e na resistência da zona de transição, com reflexos diretos na resistência à compressão do concreto. No entanto, na opinião de Mehta e Monteiro (1994), somente as características melhoradas da zona de transição parecem não serem suficientes para causar uma melhora correspondente no módulo de deformação do concreto, para o qual as características do agregado se tornam o fator limite.

Dal Molin (1995) avaliou o efeito da sílica (adição de 10% em relação à massa de cimento) na resistência à tração por compressão diametral de concretos e constatou um aumento de 22,5% após inserção da adição mineral. Entretanto, segundo Nilsen e Monteiro (1993), a melhora das características da zona de transição não leva a um aumento na resistência à tração, a qual se mantém relativamente pequena até que a resistência intrínseca dos produtos de hidratação da zona de transição seja majorada.

Em outras palavras, a resistência à tração do concreto com uma zona de transição com menor porosidade continuará a ser fraca enquanto um grande número de cristais orientados de hidróxido de cálcio estiver presente no local. Assim, o aumento da resistência

à compressão decorrente do efeito fíler não irá corresponder a um aumento proporcional na resistência à tração. Um aumento significativo na resistência à tração se dará somente quando ocorrerem as reações pozolânicas da sílica ativa, com conseqüente redução do tamanho e concentração dos cristais de hidróxido de cálcio na zona de transição (COSTENARO, 2003).

No que diz respeito à hidratação da sílica ativa, esta reage muito mais rápido se comparada com a escória. Com 1 dia de hidratação, observam-se partículas de sílica ativa sem sinais de reação (ainda na forma esférica original). Após 7 dias de hidratação, a dissolução da sílica ativa é tão avançada que as partículas começam a perder sua morfologia esférica. Em 14 dias, muitas das partículas são envolvidas na reação pozolânica, formando uma maior quantidade de gel de C-S-H. Dentro de 28 dias, muitas partículas de sílica ativa são consumidas pela reação pozolânica (DAL MOLIN, 2005).

O produto da reação inicial é um gel rico em sílica que se transforma em um C-S-H morfológicamente diferente, mais compacto. Certamente, este seja o fator que mais contribui para as resistências elevadas nos concretos compostos com matrizes de cimento Portland com sílica ativa. A subseqüente transformação do gel em C-S-H, não permite o crescimento livre de grandes cristais de CH, em qualquer estágio da hidratação (SARKAR; AITCIN; DJELLOULI, 1990).

Baseado no processo de hidratação da sílica ativa associa-se que até a idade de 7 dias, a influência da sílica ativa na resistência à compressão do concreto pode ser atribuída principalmente ao efeito físico (efeito microfíler) devido ao tamanho da partícula. Entre 7 e 28 dias, ambos os efeitos, o físico e o pozolânico, tornam-se importantes.

Concretos com resistência muito alta, compostos com sílica ativa, são marcados por ligações fortes na interface pasta/agregado, logo nas primeiras idades. A importância do consumo de CH pela reação pozolânica é estabelecida pelos contatos diretos entre o C-S-H (produto gerado pela própria reação) da pasta endurecida e o agregado sem a zona intermediária de CH orientados. Já os concretos com resistência mais baixa apresentam partículas de CH bem cristalizadas, geralmente visíveis na interface pasta/agregado, que são conhecidas por afetar negativamente as resistências mecânicas, devido à fratura ao longo dos seus planos de clivagem durante os ensaios à compressão (SARKAR; AITCIN; DJELLOULI, 1990).

Outro dado importante diz respeito à polimerização dos silicatos em matrizes com e sem sílica ativa. Com base em resultados experimentais (LI e colaboradores, 1996) foi confirmado que pasta com baixa relação a/c e com sílica ativa contém muito menos água não evaporável. Essa diferença pode ser relacionada à maior energia superficial da sílica

ativa. Como a energia e a área superficial das partículas de sílica ativa são muito altas, a quantidade de água adsorvida é maior do que a proporção física da sílica ativa. Como resultado, menos água está disponível para reagir com as partículas de cimento nas primeiras idades, agravando a situação no caso de misturas com relações a/c muito baixas, pois já se tem uma quantidade de água limitada. Neste caso, a quantidade de CH liberado da hidratação do cimento pode ser menor do que numa pasta pura e o C-S-H gerado também é reduzido. Embora a reação pozolânica entre sílica ativa e CH produza C-S-H, o total de produtos hidratados é menor do que numa pasta pura, levando a uma porosidade total maior. Este fato está de acordo com os indicadores de que a sílica ativa não reduz a porosidade total, embora contribua para o refinamento dos poros.

A reação pozolânica é muito influenciada pela relação a/ag, pois quanto menor a/ag, menos CH será gerado para reagir com a sílica ativa. Resultados experimentais (ZHANG; GJORV, 1992) confirmam que somente após 550 dias de hidratação é possível consumir totalmente o CH gerado pelo cimento, com a presença de 16% de sílica ativa (considerada em substituição à massa de cimento) em qualquer relação a/agl menor do que 0,40. Quando a relação a/agl é maior (0,60), necessita-se de uma maior quantidade de sílica ativa (25%) para se ter o mesmo efeito.

A baixa quantidade de CH numa pasta com sílica ativa pode também causar a decomposição do gel de C-S-H. A característica do gel de C-S-H, produzido pela hidratação do cimento, é ter alta relação Ca/Si e esse C-S-H é quimicamente estável apenas em solução supersaturada de CH (LI e colaboradores, 1996). Na medida em que a sílica ativa reage com CH, formando um novo C-S-H com baixa relação Ca/Si, a concentração de CH é gradualmente reduzida, e aquele C-S-H, ainda presente com alta taxa Ca/Si, torna-se instável e se decompõe (LI; LANGAN; WARD, 1996). Desde que essa decomposição aumente a concentração de CH, um novo equilíbrio é alcançado na solução. Quando o C-S-H original se decompõe, a estrutura da pasta com sílica ativa pode tornar-se mais porosa (LI; LANGAN; WARD, 1996).

A dissolução do C-S-H via reação pozolânica com a sílica ativa contribui para formar um caminho conectado na porosidade inerente à zona de transição na interface pasta/agregado, que é reconhecidamente a parte mais fraca no concreto, devido à exsudação interna e a maior concentração de CH nesta região (BENTS; STUTZMAN, 1997). Obviamente, este fenômeno é uma função da relação água/sólidos no concreto, bem como de sua história de cura.

De qualquer modo, há evidências da sinergia das duas adições (escória e sílica ativa) porque elas diminuem drasticamente a quantidade de CH no concreto ou afetam a morfologia dos cristais de CH. Isto tem tanta importância no desenvolvimento de resistência do concreto, quanto tem a maior formação de C-S-H, resultante da reação pozolânica. Os papéis dos dois materiais cimentícios suplementares, sílica ativa e escória, são complementares no sentido de que a sílica ativa contribui para o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais, considerando que a progressiva hidratação da escória, bem mais lenta, contribui para a resistência nas idades mais avançadas. A escória também permite que a água hidrate primeiro o cimento, o que é importante em misturas com baixa relação a/agl.

### 3.1.3. Aditivo superplastificante

Segundo a ABNT NBR 11768 (2011, p.3) os aditivos superplastificantes (tipo SP), também chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência pela norma americana ASTM C494 (1992), são definidos como:

[...] produtos que aumentam o índice de consistência do concreto mantendo-se a quantidade de água de amassamento constante, ou ainda, como os produtos que possibilitam a redução mínima de 12% da água de amassamento na produção de um concreto com uma dada consistência.

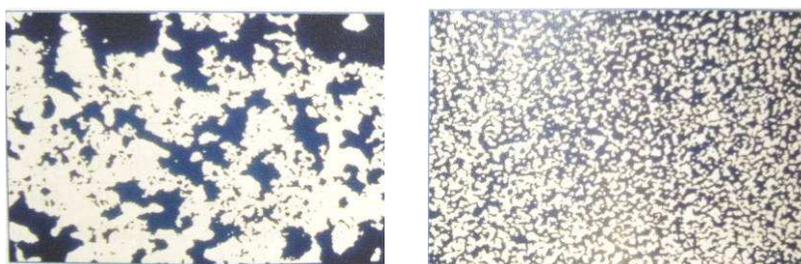
O efeito do aditivo superplastificante é diretamente sobre as partículas de cimento, caracterizado pela ação defloculante ou dispersante. Desta forma, faz-se necessário abordar o comportamento do cimento Portland quando em contato com a água.

De acordo com Castro, Liborio e Pandolfelli (2009) as partículas de cimento apresentam uma grande tendência à aglomeração quando entram em contato com um líquido polar como a água, devido a vários tipos de interação: forças de atração interpartículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Assumir tal estrutura aglomerada implica na retenção de certa quantidade da água de mistura e, com isso, a geração de uma rede aberta de canais entre as partículas. Essa rede de vazios pode aprisionar parte da água que, por essa razão, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura (AÏTCIN; JOLICOEUR; MacGREGOR, 1994).

Os aglomerados formados, permanentes ou não, além de influenciar a reologia das suspensões, podem interferir no empacotamento e, conseqüentemente, na microestrutura do material. Com isso, são gerados produtos com maior quantidade e/ou tamanho de defeitos e com microestruturas heterogêneas. Assim, os aglomerados devem ser eliminados, buscando sempre suspensões dispersas que, além de apresentarem menor viscosidade, permitem a utilização de maiores concentrações de sólidos no processo. Nestas suspensões, as partículas encontram-se individualizadas, sendo pouco influenciadas pela ação da gravidade, permitindo que permaneçam homogêneas e estáveis por um maior período de tempo (OLIVEIRA e colaboradores, 2000).

Para se obter suspensões dispersas, as forças de repulsão entre as partículas devem superar as forças de atração. Assim, o uso de dispersantes (superplastificantes) torna-se necessário para evitar a sedimentação de partículas e conseqüente segregação de fases, possibilitando a preparação de suspensões homogêneas com alta concentração de sólidos. Esses aditivos são eficientes na desaglomeração das estruturas de partículas de cimento e em sua dispersão, evitando uma ligação prematura, minimizando a quantidade de água necessária para a adequada trabalhabilidade da suspensão e resultando em misturas trabalháveis pelo intervalo de tempo necessário à sua aplicação.

A Figura 24 mostra a diferença entre o cimento floculado e o defloculado, para pastas com relação a/c igual a 0,5.



**Figura 24: Cimento floculado (esq.) e cimento defloculado (dir.).  
Fonte: Martin (2005).**

A grande afinidade das moléculas de aditivo com a superfície das partículas de cimento pode resultar tanto em uma interação física quanto química. A interação física decorre da adsorção das moléculas de aditivo sobre a superfície das partículas de cimento, enquanto que, na interação química, o aditivo pode reagir com os produtos da hidratação do cimento (ERFOGDU, 2000). Como o aditivo interage com as reações químicas em andamento, uma fase organomineral pode ser formada em torno das partículas de cimento

durante a hidratação do  $C_2S$ , assim como pela precipitação da solução aquosa (FLATT; HOUST, 2001).

Sendo assim, de uma maneira geral, o aditivo adicionado às misturas à base de cimento pode ser dividido em três partes: parte é consumida pelas reações químicas, em particular durante a formação da etringita e do C-S-H; parte é adsorvida sobre a superfície das partículas de cimento e não é integrada à fase organomineral na escala de tempo necessária para a aplicação do concreto; e parte corresponde ao aditivo que permanece na fase aquosa, uma vez que polímero suficiente tenha sido adicionado para satisfazer o consumo de aditivo (o sistema pode ser considerado como saturado com aditivo) (FLATT; HOUST, 2001).

A produção de concretos pode necessitar da incorporação de aditivos superplastificantes para assegurar a fluidez adequada para sua aplicação. A melhora na fluidez é conseguida principalmente por uma melhor dispersão das partículas sólidas por meio de forças de repulsão e, normalmente, o termo estabilização eletroestérica é usado para descrever o mecanismo de dispersão imposto por eles. A estabilização eletroestérica é uma combinação da repulsão eletrostática da dupla camada elétrica e da repulsão estérica, onde a variação e a magnitude de cada contribuição dependem de parâmetros tais como a quantidade de aditivo adsorvido, o grau de dissociação do polieletrólito, a densidade do conjunto de cargas na superfície e a força iônica (FLATT, 2004; KAUPPI; ANDERSSON; BERGSTRÖM, 2005).

Uchikawa, Hanehara e Sawaki (1997) complementam que o aumento das forças eletrostáticas repulsivas causadas pela adsorção do aditivo nas partículas sólidas de cimento é gerado pela formação de uma dupla camada elétrica e pelo incremento do potencial superficial, já as forças repulsivas “estéricas” são baseadas na interação das camadas de adsorção dos aditivos e consideradas como principais na determinação da fluidez da pasta.

As interações entre o cimento e o aditivo são dependentes da temperatura ambiente, da finura e da composição do cimento, especialmente em relação aos teores de  $C_3A$ ,  $SO_3$  e álcalis, que controlam a evolução da formação da etringita. A reação entre o sulfato de cálcio e a fase  $C_3A$  do clínquer do cimento Portland, que conduz a produtos em forma de agulhas (AFt), é retardada e os produtos da reação são menores, com partículas em forma cúbica. Geralmente, observa-se também que o superplastificante retarda a conversão da AFt em AFm (MELO, 2000). Ainda segundo o autor, para o cimento tipo V (classificação ASTM) com baixo teor de  $C_3A$ , pode-se ter uma excessiva adsorção de superplastificante no sistema em processo de hidratação quando utilizado em altos teores.

Isso, por sua vez, pode ser relacionado com a resistência à compressão mais baixa, visto que a excessiva adsorção de superplastificante retarda a hidratação dos grãos de alita e belita.

Em cimentos, a hidratação do  $C_3S$  é retardada também, mas o grau de retardamento não é tão significativo quanto o  $C_3S$  puro, porque parte do SP é adsorvido pela fase  $C_3A$ . Além disso, existe a evidência de que a taxa  $CaO/SiO_2$  dos produtos C-S-H é também alterada, sendo que 2% de aditivo sulfonado-melamina-formaldeído (SMF) altera a relação  $CaO/SiO_2$  de 1,19 para 1,21 (RAMACHANDRAN, 1985).

O tempo de ação de um superplastificante é limitado pela reação entre o  $C_3A$ , a água e o íon sulfato e pelo crescimento da camada de minerais hidratados. Assim, um aditivo superplastificante que pudesse ter um bom desempenho independentemente do método de adição seria muito apreciado em uma usina de concreto ou em uma indústria de elementos pré-moldados, pois se reduziria a variabilidade do abatimento determinado para a mistura fresca ou da resistência no estado endurecido, ambos normalmente influenciados pela mudança no procedimento de adição do aditivo (COLLEPARDI, 1998).

Conforme já mencionado, as partículas de cimento estão sujeitas a um fenômeno em que há uma tendência de aglomeração, criando-se flocos, com conseqüente perda da trabalhabilidade do material. Isso ocorre porque os silicatos apresentam potencial elétrico negativo, enquanto as fases  $C_3A$  e  $C_4AF$  apresentam um potencial positivo, e na solução aquosa formada durante a hidratação do cimento há uma inversão de polarização, com formação, respectivamente, de uma carapaça de íons  $H^+$  e íons  $OH^-$  (RAMACHANDRAN, 1985).

Os concretos convencionais então se portam de duas maneiras, uma como que se tivessem partículas de cimento de grandes dimensões, hidratando-se parcialmente, oferecendo resistência pelo embricamento de partículas, e outra, como se tivessem uma quantidade de cimento menor que aquela notadamente utilizada (LIBORIO, 2003). Essa é uma das razões para o fato de que há necessidade de um consumo maior de cimento Portland, para os concretos produzidos apenas com cimento, agregados e água, para se produzir 1 MPa de resistência à compressão, aos 28 dias de idade. Dentro desse contexto, os aditivos superplastificantes, poderão ser escolhidos tanto para atuarem sobre os silicatos quanto sobre as outras fases.

Como a quantidade de silicatos é muito maior que o  $C_3A$  e  $C_4AF$ , esses aditivos, por razões econômicas, são produzidos para atuarem sobre essas últimas fases, funcionando como dispersantes, proporcionando maior fluidez e evitando aglomerações. A decorrência desse fato, é que além de haver um maior aumento de fluidez, ocorre a

hidratação de uma maior quantidade de partículas, conseguindo-se então, produzir 1 MPa de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, com menor quantidade de cimento Portland.

Surge assim outro fato interessante, que é o de se imaginar traços de concretos 1:m, m = 3,5 ou 5 ou 6,5, e querer obter traços de concretos com mesma consistência, mantendo-se o teor de superplastificante. Normalmente, para mesmos agregados, os traços mais pobres exigirão maior quantidade de água, mas em contrapartida terão uma quantidade de cimento Portland muito menor que os traços mais ricos. Como há uma quantidade menor de C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, o aditivo superplastificante utilizado será tanto mais eficiente na mistura, chegando-se a resistências mecânicas, para esses traços mais pobres, que superam os traços médios ou mais ricos (MELO, 2000; TIBONI, 2007). Dentro dessa concepção tem sido possível produzir 1 MPa com 4,5 kg de cimento, ou menos (CATOIA, 2007; REBMANN, 2011).

O fato dos aditivos mais atuais proporcionarem também o efeito eletroestérico, conforme já mencionado, vem colaborar positivamente para os traços mais pobres, porque têm pouco cimento Portland, decorrendo maior quantidade de partículas hidratadas e maior resistência mecânica.

Os aditivos superplastificantes podem então, conferir uma maior fluidez ao concreto, mantendo-se a relação água/cimento, ou proporcionar grandes resistências mecânicas, pela redução da relação água/cimento, ou proporcionar uma redução da quantidade de cimento, mantendo-se a resistência mecânica desejada, e de um modo mais amplo, torna possível obter concretos em que o calor de hidratação seja um fator importante a considerar. Entretanto, o simples uso de aditivos superplastificantes não resolve a problemática por si só, havendo a necessidade de um planejamento para uso eficaz e adequado do material e necessidade de alguns conhecimentos da reologia do concreto no estado fresco (CASTRO, 2007). Planejamento este que envolve desde a escolha do superplastificante e sua compatibilidade com o cimento utilizado, até a metodologia de incorporação do aditivo nas misturas cimentícias.

Pelo fato de nem todos os tipos e marcas de superplastificantes reagirem da mesma forma com um determinado cimento, a escolha do aditivo deve ser feita com base em estudo de compatibilidade entre uma determinada marca de superplastificante diretamente através das características reológicas de uma pasta ou concreto, em relação ao cimento a ser utilizado. Quanto à metodologia de incorporação do aditivo, Castro (2007), em programa experimental, avaliou quatro procedimentos diferentes de misturas confeccionadas com cimento CPV ARI, 10% de sílica ativa, relação a/agl igual a 0,40 e 0,61% de aditivo

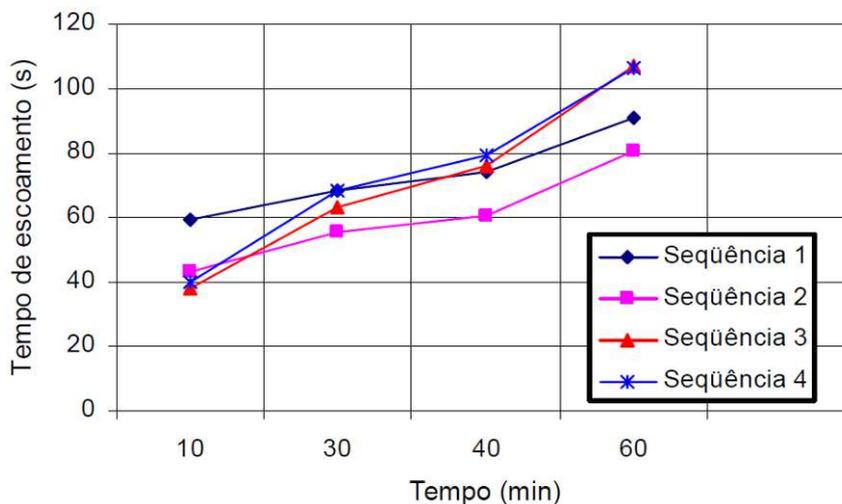
superplastificante (SP), onde a ordem de colocação dos materiais constituintes foi variada, conforme Tabela 3.

**Tabela 3: Variação do procedimento de mistura e os correspondentes tempos de escoamento. Fonte: Castro (2007).**

Seq.	Procedimento					Tempo de medida (min)	Tempo de escoamento (s)	
	Passo	Material incorporado	T <sub>R</sub> (s)	T <sub>m</sub> (s)	V <sub>m</sub>		CPV ARI Plus	CPV ARI RS
1	1	CP, SP e água (a/c=0,36)	---	60	baixa	10	59,25	47,95
	2	Sílica	60	60	baixa	30	68,29	58,33
	3	água restante	60	30	baixa	40	74,23	61,02
2			---	150	alta	60	90,80	65,95
	1	CP, 1/2SP e água (a/c=0,36)	---	60	baixa	10	<b>43,27</b>	37,52
	2	Sílica	60	60	baixa	30	<b>55,70</b>	45,25
	3	1/2SP e água restante	60	30	baixa	40	<b>60,53</b>	49,35
3			---	150	alta	60	<b>80,41</b>	56,97
	1	CP e água (a/c=0,36)	---	60	baixa	10	37,91	<b>33,42</b>
	2	Sílica	60	60	baixa	30	63,09	<b>39,88</b>
	3	SP e água restante	60	30	baixa	40	76,08	<b>41,53</b>
4			---	150	alta	60	107,32	<b>45,26</b>
	1	CP e Sílica	---	30	baixa	10	40,26	35,57
	2	água (a/c=0,36)	---	60	baixa	30	68,55	42,99
			30	60	baixa	40	79,19	47,35
3	SP e água restante	60	30	baixa	60	106,53	55,15	
		---	150	alta				

onde: T<sub>r</sub> = tempo de repouso; T<sub>m</sub> = tempo de mistura; V<sub>m</sub> = velocidade de mistura (baixa ≈ 65 RPM; alta ≈ 130 RPM).

Para Castro (2007), o procedimento que deve ser adotado corresponde àquele que mantiver o menor tempo de escoamento, medido pelo ensaio de cone de Marsh, durante uma hora, uma vez que o tempo de escoamento corresponde ao inverso da fluidez da pasta, ou seja, quanto menor o tempo de escoamento medido, maior a fluidez da pasta (Figura 25). Desta forma, concluiu-se que os melhores procedimentos de mistura para pastas produzidas com CPV ARI e CPV ARI-RS, foram as seqüências 2 e 3, respectivamente.



**Figura 25: Curvas do tempo de escoamento versus tempo para pastas de cimento produzidas com CPV ARI em função da seqüência de mistura adotada.**  
Fonte: Castro (2007).

Outro aspecto que contribui para a melhoria da fluidez de pastas de cimento é a adição atrasada de superplastificante. Isto ocorre pelo fato do teor de  $C_3A$ , que é responsável pela redução da fluidez destas pastas, ser reduzido durante os 10 primeiros minutos de hidratação e porque a absorção de aditivo sobre o  $C_3S$  e  $C_3A$  não hidratados ser maior do que os mesmos para as fases hidratadas (AIAD<sup>26</sup>, 2003 apud CASTRO, 2007).

Diante de tais considerações, a ordem de mistura usada para confeccionar a calda de impregnação será baseada no procedimento de mistura relativo à seqüência 3 do estudo de CASTRO (2007). Os detalhes deste procedimento serão vistos na seção 4.3.3. (Procedimentos de mistura).

## 3.2. Agregados

### 3.2.1. Características dos agregados

O agregado desempenha uma função econômica da máxima importância, pois geralmente é o elemento de custo mais baixo por unidade de volume no concreto. Atua de maneira decisiva no incremento de certas propriedades, tais como, a redução da retração e o aumento da resistência ao desgaste e do módulo de elasticidade. A influência das

<sup>26</sup> Influence of time addition of superplasticizers of the rheological properties of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1229-1234, Aug. 2003.

propriedades dos agregados na resistência dos concretos convencionais é pequena, desde que estes sejam de boa qualidade. Porém, apresentam uma influência significativa quando utilizados em concretos de alta resistência ou concretos de elevado desempenho, uma vez que sua resistência não é mais muito superior à da matriz e à da zona de transição.

Existem características dos agregados, tais como granulometria, forma, textura superficial, mineralogia, resistência mecânica, absorção e umidade superficial e substâncias nocivas, que interferem principalmente nas características da zona de transição, afetando assim a resistência do concreto, e que precisam ser consideradas; mormente quando se trata de agregados deficientes física e mineralogicamente, como é o caso deste estudo.

### **1. *Granulometria***

A granulometria do agregado influencia na quantidade de água, para uma mesma consistência. Agregados mais finos, de angulosidade parecidas, exigem quantidade de água maior. Metha e Monteiro (2008) afirmam que a distribuição granulométrica do agregado deve ser adequada a ponto de proporcionar maior densidade no empacotamento das partículas, ocasionando menor consumo de cimento para uma determinada trabalhabilidade e um menor custo da obra. Com isso, a composição de agregados tem sido bastante utilizada, visando-se a obtenção de maior massa unitária ou menor índice de vazios.

### **2. *Forma e textura superficial***

A forma das partículas e a textura superficial do agregado, responsáveis pelas ligações entre a pasta e o agregado, são características importantes, pois influenciam na trabalhabilidade, no ângulo de atrito interno e na compacidade das misturas de concreto. É possível obter maior abatimento, para uma mesma quantidade de água, com agregados mais finos, porém com um bom índice de forma. O índice de forma dos agregados graúdos pode ser determinado segundo a ABNT NBR 7809:2006, cujo valor é dado pela média da relação  $C/e$  de todos os grãos medidos, onde “C” é a largura e “e”, a menor distância entre dois planos paralelos à medida “C”. Se este índice estiver próximo de 1, diz-se que o agregado possui forma quase cúbica tendendo para a forma arredondada; se estiver próximo de 3, o agregado apresenta-se em forma de lamelas ou agulhas, o que pode prejudicar a consistência do concreto, além de outros fatores, sendo portanto um limite que estabelece a utilização do agregado quanto a sua forma. Agregados mais angulosos promovem menor abatimento. Uma forma de avaliar a angulosidade do agregado miúdo é por meio do índice de vazios. Considera-se que agregados mais arredondados possuem

índice de vazios próximo de 33 %. Quanto mais anguloso, maior será o índice de vazios. Em geral têm-se valores de 0 a 11 % acima deste limite mínimo (LIBORIO, 2003). Ressalta-se que este procedimento vale para agregados com faixa granulométrica não muito variada.

A forma dos agregados grãos poderá interferir também na resistência do concreto e ainda, criar grandes falhas no mesmo. A fim de evitar tal comportamento, a forma equidimensional das partículas é preferível, pois aquelas que se afastam desse formato têm maior área superficial e se acomodam de modo anisotrópico (alongadas e as lamelares). Essa situação poderá causar tensões de flexão, por exemplo, na partícula, rompendo-a com pequenos carregamentos.

A textura superficial do agregado é outra característica muito importante por estar associada com a aderência entre este e a pasta hidratada de cimento que o envolve. No caso dos agregados leves<sup>27</sup>, a boa aderência ocorre pela textura áspera da superfície do agregado, resultando em um intertravamento mecânico entre o agregado e a pasta (NEVILLE, 1997; ZHANG; GJORV, 1992). Apesar da laterita não se enquadrar como agregado leve, ela também apresenta superfície com textura áspera que favorece a aderência com a pasta de cimento. Já o seixo natural, de modo geral, apresenta uma forma arredondada e textura lisa, prejudicando a ligação entre ele e a pasta.

Rochas britadas apresentam uma textura rugosa e, dependendo do tipo de rocha e da escolha do britador, as britas podem conter uma proporção considerável de partículas chatas ou alongadas, as quais afetam negativamente muitas propriedades do concreto. Isso ocorre porque partículas chatas e alongadas têm uma tendência maior de acumular água (exsudação interna), tornando a zona de transição mais porosa e propensa à fissuração. Além disso, as partículas angulosas exigem mais água de amassamento, pois áreas superficiais maiores para mesmo volume necessitam de mais água de molhagem. Sendo assim, a presença de 10% a 15%, em massa, de partículas alongadas é indesejável ao concreto, justamente para não comprometer a durabilidade do concreto (LIBORIO, 2003).

A textura superficial é baseada em uma avaliação visual e depende da dureza, granulação e características dos poros da rocha-mãe (NEVILLE, 1997). Não existe método de medida normalizado no Brasil, podendo-se adotar a classificação da BS 812-105.2 (1990)<sup>28</sup> apud Neville (1997) mostrada na Tabela 4 como parâmetro.

---

<sup>27</sup> São considerados agregados leves aqueles com massa unitária menor que 1000kg/m<sup>3</sup>, tais como pedra pome, vermiculita, argila expandida, etc. (ABNT **NBR 9935:2011**).

<sup>28</sup> BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 812-105.2**: Testing aggregates. Methods for determination of particle shape. Elongation index of coarse aggregate. (in two parts). London, 1990.

**Tabela 4: Textura superficial dos agregados, com exemplos.**

Grupo	Textura	Característica	Exemplos
1	Vítrea	Fratura conchoidal	Calcedônia, escória vitrificada
2	Lisa	Erodido por água, ou devido à fratura de cristais finos ou laminares	Seixo, ardósia, mármore, alguns riólitos
3	Granulosa	Fratura mostrando grãos uniformes mais ou menos arredondados	Arenito, oólito
4	Áspera	Fratura áspera de rochas fina ou grosseiramente granuladas com cristais não facilmente visíveis	Basalto, felsito, calcário
5	Cristalina	Com constituintes cristalinos facilmente visíveis	Granito, gabro, gnaisse
6	Alveolar	Com poros e cavidades visíveis	Tijolo, pedra pomes, espuma de escória, clínquer, argila expandida

Fonte: BS 812-105.2: 1990, apud Neville, 1997.

Devido à aspereza da superfície das partículas de agregado, a aderência pasta/agregado ocorre a partir do intertravamento do agregado com a pasta de cimento hidratada e é influenciada por outras propriedades físicas e químicas do agregado, relacionadas com sua composição química e mineralógica e com a condição eletrostática da superfície. Mehta e Monteiro (1994) citam evidências de que, pelo menos nas primeiras idades, a resistência do concreto, em particular a resistência à flexão, pode ser afetada pela textura superficial do agregado e que texturas mais ásperas favorecem a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado. Em idades mais avançadas, esse efeito não é tão importante, pois ocorre o desenvolvimento de uma forte aderência química entre a pasta e o agregado. Agregados como o calcário, a dolomita e, possivelmente, agregados silicosos promovem boa aderência química com a matriz de cimento (NEVILLE, 1997).

### **3. Mineralogia**

O conhecimento da composição mineralógica do agregado ajuda a identificar se determinados elementos químicos, capazes de provocar reações indesejáveis com o aglomerante de cimento Portland, estão presentes acima dos níveis de segurança aconselháveis, além de dar indicativos de muitas de suas propriedades físico-mecânicas. O exame geológico do agregado é muito útil para avaliar a sua qualidade e, em particular, para comparar um agregado ainda não utilizado com outro cujo desempenho já seja conhecido.

Algumas características físicas (modificações de volume por variação de umidade) e químicas (reação com os álcalis do cimento) dos agregados intervêm no comportamento do concreto, sendo então indispensável conhecer a natureza destes materiais. Por exemplo: concretos produzidos com quartzito apresentam um elevado módulo de elasticidade, mas baixa resistência à compressão, porque esse agregado apresenta uma dureza relativamente alta que melhora a rigidez do concreto, porém causa concentração de tensões na interface, quando altamente tencionado. Portanto, agregado com módulo de elasticidade muito mais elevado que a matriz de cimento provoca uma concentração crucial de tensão e subseqüentemente microfissuras na zona de transição reduzindo a resistência à compressão (BAALBAKI e colaboradores, 1993). Já os concretos produzidos com agregado de rocha calcária calcítica apresentaram baixo módulo de elasticidade e resistência à flexão, devido ao excesso de calcita presente no agregado, o que torna o calcário calcítico um agregado de composição mineral fraco e de pouca dureza (CETIN; CARRASQUILLO, 1998).

Caso seja economicamente inviável evitar agregados fracos e/ou altamente porosos uma alternativa possível a ser avaliada é a mitigação do problema, aplicando-se técnicas de dopagem, como as que são propostas neste estudo, pelas quais se realiza um tratamento superficial ou da porosidade do agregado, podendo obter melhora das características (TRIGO; REBMANN; LIBORIO, 2010).

#### **4. Resistência mecânica**

Os agregados usados habitualmente na produção do concreto têm resistência mecânica superior à do próprio concreto, raramente se constituindo num fator limitante. Apenas no caso de se utilizarem agregados oriundos de rochas com tensão de ruptura inferior a cerca de duas vezes a da pasta de cimento a resistência do concreto irá depender da resistência do agregado.

Para a maioria das aplicações correntes, a tensão de ruptura da rocha que constitui o agregado deve ter entre 60 MPa a 70 MPa, apesar de não se descartar a utilização de rochas com resistências menores. Já em concretos de alto desempenho recomenda-se a utilização de agregados oriundos de rochas com resistências de ruptura superiores a 150 MPa. Na região de São Carlos, por exemplo, os agregados graúdos normalmente provêm de rochas basálticas, cuja tensão de ruptura encontra-se na faixa de 150 MPa a 240 MPa (dados do Departamento de Geotecnia - EESC-USP - valor médio). Na Tabela 5 são evidenciadas as características de alguns tipos de rochas.

**Tabela 5: Característica mecânica de alguns tipos de rochas.**

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

<sup>1\*</sup> resistência da ligação pasta agregado curado por um mês (MPa), determinada em ensaio de resistência à tração direta.

**Fonte: Uchikawa (1993a, 1993b); Thomass; Floyd (1963); Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structure (1991).**

O agregado adequado para concretos de elevado desempenho deve ser resistente, sem alterações mineralógicas e com características cristalinas finas, pois agregados com minerais parcialmente modificados, com fissuras intra e intergranular, além da presença de plano de laminação e clivagem, enfraquecem o agregado, afetando a resistência final do concreto.

Giacco e colaboradores (1992) produziram concretos com três tipos diferentes de agregados, basalto, granito e calcário, sendo que os concretos apresentaram resistência à compressão de 92MPa, 80MPa e 62MPa, respectivamente, mantendo-se uma relação água/aglomerante constante e igual a 0,3 mais 2,5% de superplastificante. Nesse estudo os autores concluíram que o uso de agregados de maior dureza não necessariamente implica em menor resistência: a resistência da ligação matriz/agregado ou pasta/agregado torna-se mais importante na resistência à tração na flexão do que na resistência à compressão.

A resistência de agregados de origem até então nunca experimentada pode ser avaliada a partir dos seguintes ensaios: determinação da tensão de ruptura da rocha originária (amostras representativas da rocha são ensaiadas à compressão, de acordo com a ABNT NBR 10341:2006); determinação da resistência ao esmagamento através de ensaios de compressão confinada sobre um grupo de partículas, conforme prescrito pela ABNT NBR 9938:1987 (este ensaio é indicado quando apenas se dispõe de partículas que compõem o agregado e seu resultado é sensivelmente concordante com o resultado de compressão da rocha); ensaios de desgaste realizados em amostras da rocha originária ou do próprio agregado, como o ensaio de abrasão Los Angeles (ABNT NBR NM 51:2001); ensaios de resistência à compressão ou ao esmagamento sobre partículas individuais (mais aplicado para o caso de agregados leves); e ensaios comparativos, em que a tensão de ruptura do concreto confeccionado com o agregado em estudo é comparada com a de um

concreto padrão executado em condições rigorosamente idênticas. Os dados de resistência da laterita e do seixo rolado existentes na literatura foram confirmados através de ensaios de resistência à compressão em amostras cúbicas ( $1\text{cm}^3$ ) destes materiais.

### 5. Absorção e umidade superficial

Os dados de absorção, absorção efetiva e umidade superficial, tanto dos agregados miúdos quanto graúdos, são necessários para correção da proporção de água do traço de concreto, em misturas realizadas a partir de materiais estocados sujeitos a variações climáticas ou mesmo a variações de umidade relativa do ar. Em geral, as rochas de boa qualidade usadas como agregado para concretos mostram valores de absorção muito baixos (até 1%), enquanto aquelas mais porosas ou alteradas pelo intemperismo podem mostrar valores de absorção elevados ( $> 3\%$ ) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Futida (2005) apresenta a característica porosa do agregado laterítico (Figura 26) relacionado-a com a elevada absorção de água deste material. Se o agregado absorver água da interface pasta/agregado, isto poderá causar problemas na continuidade da matriz, redundando numa baixa resistência do material concreto constituído.

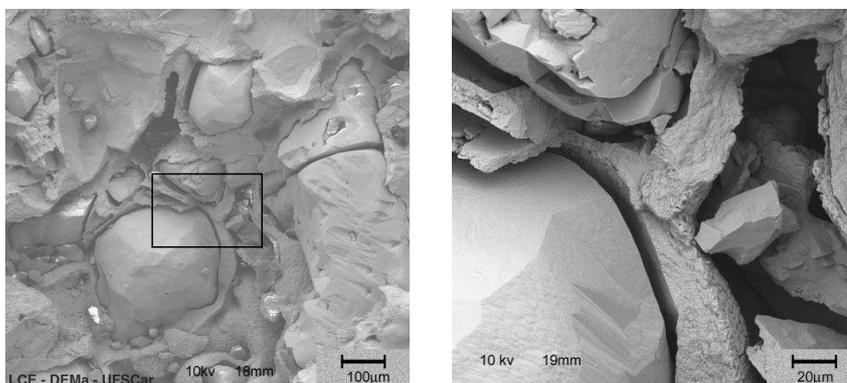


Figura 26: Característica porosa da laterita, utilizando MEV.

Fonte: Futida (2005).

### 6. Substâncias nocivas

Para não afetar significativamente o comportamento e as propriedades do concreto deve ser analisado se os agregados contêm agentes agressivos e deletérios, que podem interferir fisicamente (trabalhabilidade, pega e endurecimento do concreto) e quimicamente.

As partículas finas tais como argila, silte e pó de pedra podem exigir um grande volume adicional da água de amassamento, e, no caso específico da argila, ela pode ser

adsorvida pela superfície dos grãos de cimento, impedindo a difusão de íons que significará em uma cristalização irregular e heterogênea dos componentes hidratados, além de alterar a pega e endurecimento e diminuir a resistência final do concreto, tanto à tração quanto à compressão. As partículas com baixa resistência e com expansões e contrações excessivas, como é o caso das partículas xistosas, das argilas e do carvão também afetam negativamente o comportamento do concreto pelo fato de se alterarem fisicamente quanto à distribuição granulométrica.

As partículas mais conhecidas por interferirem quimicamente no comportamento do concreto são os álcalis do cimento (sódio e potássio) que reagem com a sílica do agregado, na reação álcali-agregado; freqüentemente observada. Para os concretos de alto desempenho, nos quais a porosidade é refinada e o material conseqüentemente é pouco permeável, esse fenômeno poderá ser minimizado, até pela insuficiência de água livre (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Em todo caso, recomenda-se não usar agregados reativos, o que nem sempre é possível, seja porque não existem agregados não reativos disponíveis, seja porque o transporte de agregados não reativos é muito custoso – cabe lembrar aqui que a técnica de dopagem, por meio da impregnação do agregado, é uma opção para essa problemática. Há ainda a possibilidade de selecionar qualitativamente os agregados, avaliando-se em que tipo de estrutura eles serão usados, condições climáticas, etc., e lançando-se mão de medidas de mitigação da reação: substituição do cimento e utilização de adições minerais (BATTAGIN, 2010).

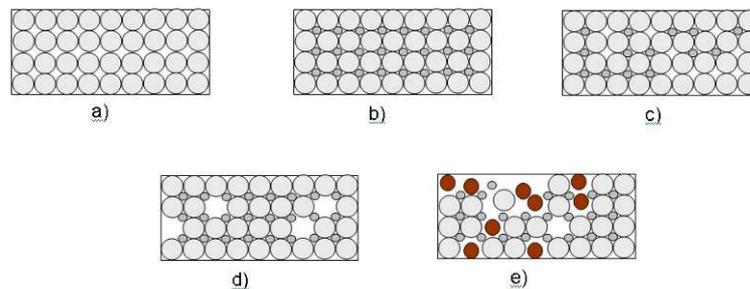
### **3.2.2. Empacotamento dos agregados**

Conforme citado anteriormente, a resistência do concreto está intrinsecamente relacionada à sua porosidade. Na busca por menor porosidade, uma opção é ocupar o máximo volume possível com agregados e usar o mínimo consumo de cimento. Isto acarreta em maior área superficial de agregados e, portanto, mais zonas de interface, o que poderia ser prejudicial ao concreto. Entretanto, estudos experimentais comprovam que é perfeitamente possível produzir concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento, sem comprometer a durabilidade do material (REBMANN, 2011). Além disso, estudos mostraram que concretos com maior quantidade de agregados e mesma relação água/cimento, são menos permeáveis (SCRIVENER, CRUMBIE e LAUGESSEN, 2004).

O máximo volume possível ocupado com agregados é obtido por meio de um processo denominado de empacotamento de partículas, o qual McGeary (1961) apud Oliveira e colaboradores (2000) define como sendo:

[...] o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente.

Alguns modelos de empacotamento têm sido propostos como ferramentas para calcular a densidade de empacotamento das partículas e, assim, otimizar misturas granulares de concretos. O modelo conceituado por Oliveira e colaboradores (2000) é apresentado na Figura 27.



**Figura 27: Modelo de empacotamento segundo Oliveira e colaboradores (2000).  
Fonte: Oliveira e colaboradores (2000).**

O caso a) tem ocupação média de 67% do volume de vazios, num sistema monodisperso (partículas de mesmo tamanho); o caso b) teoricamente é uma condição para a máxima condição de empacotamento; o caso c) tem ausência de quantidade de finos; o caso d) tem ausência de partículas grandes e, o caso e) apresenta um empacotamento deficiente.

O empacotamento de partículas além de tornar os produtos constituídos mais econômicos, tende a produzi-los sem grandes alterações volumétricas. Além disso, outras vantagens são obtidas por um alto empacotamento: melhorias na resistência, rigidez, fluência, retração por secagem e permeabilidade e redução na segregação caso o alto empacotamento seja acompanhado de granulometria contínua e menores diferenças de

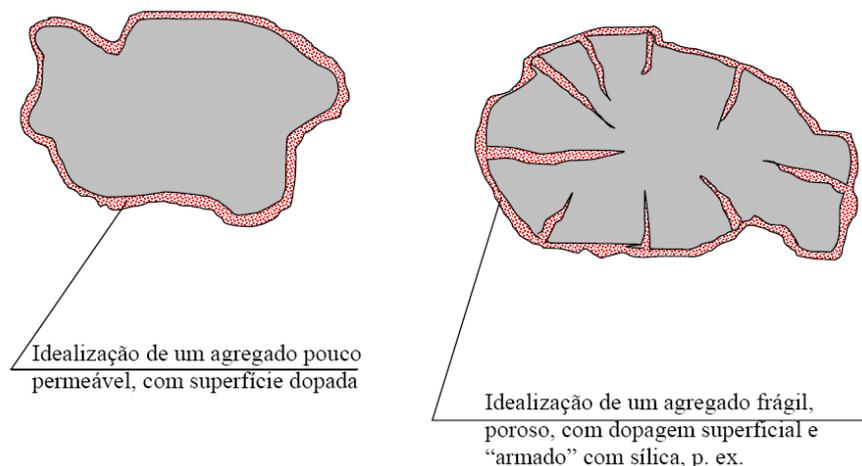
tamanho entre as partículas das diversas graduações (JOHANSEN; ANDERSEN<sup>29</sup>, 1991 apud KOEHLER; FOWLER, 2007).

Além da distribuição granulométrica, que altera a condição de monodispersão, outros fatores afetam o empacotamento de partículas. A morfologia das partículas afeta o empacotamento à medida que se afasta da forma esférica: quanto mais alongada for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha. O efeito parede interfere no empacotamento quando a relação entre o tamanho de partículas for muito grande, ou seja, quando as partículas pequenas, em alta quantidade, estiverem adjacentes aos agregados de grande tamanho e puderem ser considerados como superfícies planas. O efeito parede também pode ocorrer em regiões próximas à fôrma e à armadura. A maneira como as partículas são colocadas em suas devidas posições também irá interferir no resultado de empacotamento, sendo que partículas depositadas aleatoriamente em um recipiente e submetidas à vibração ocasionarão maior empacotamento. O estado de dispersão das partículas também é importante, principalmente em se tratando de partículas finas que possuem tendência a se aglomerar formando flocos, sendo muitas vezes necessário utilizar dispersantes. A porosidade interna das partículas também influencia na obtenção do empacotamento de partículas, sendo necessário que se utilizem partículas densas, com a menor porosidade possível (OLIVEIRA e colaboradores, 2000).

No que se refere à porosidade interna, nos sistemas com cimento Portland, é possível que se faça uma dopagem do material, transformando uma partícula com poros abertos em um material denso, além de proporcionar uma textura superficial, tanto para as partículas porosas quanto para as densas, que facilite a aderência entre as partículas; o que melhora inclusive a zona de transição na interface entre os materiais, conforme se observa na Figura 28 (LIBORIO, 2003).

---

<sup>29</sup> JOHANSEN, V.; ANDERSEN, P. J. Particle Packing and Concrete Properties. In: SKALNY, J.; MINDESS, S. (eds.). **Materials Science of Concrete II**. Westerville, OH: American Ceramic Society, 1991, p. 111-147.



**Figura 28: Dopagem de agregados para aumentar a aderência e propiciar seu reforço.**  
**Fonte: Liborio (2003).**

Nos últimos anos, o interesse pelo empacotamento das partículas tem aumentado nas diferentes áreas da engenharia. Esse interesse pode ser explicado pelo fato de que uma grande parte dos materiais naturais ou industriais com os quais se lida diariamente são – ou contém – partículas de diferentes formas e tamanhos. Assim, o comportamento de tais materiais depende parcialmente das propriedades das partes que o compõem e parcialmente das interações entre elas (STROEVEN; STROEVEN, 1999).

Com a utilização de aditivos superplastificantes e o empacotamento de partículas, os concretos de um modo geral apresentam uma maior densidade devido à redução na quantidade de água de mistura e vazios. Além disso, componentes finos e ultrafinos, com formato esférico – adições (sílicas de silício metálico ou metacaulinita) – têm sido adicionados às misturas tanto para facilitar o auto-adsensamento quanto para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes entre os grãos, aumentando ainda mais a densidade desses materiais (REBMANN; TRIGO; LIBORIO, 2010). Assim, o conceito de uma alta densidade de empacotamento foi recentemente redescoberto como um parâmetro chave para a obtenção de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho.

Esses estudos são importantes devido ao fato da resistência mecânica e módulo de elasticidade dependerem, em parte, da característica da matriz (além do próprio agregado). Assim, uma das possibilidades é melhorar a matriz que envolve um agregado de péssima qualidade. Outra situação é o reforço do próprio agregado, como já se mencionou.

Há obras em que todos esses estudos não são viáveis de serem implantados na prática, no entanto em outros casos isso é necessário. A técnica de empacotamento de agregados, considerada simplista, resolve, e muito bem, situações em que não se faz todos esses estudos, e sim, apenas a parte dos agregados, inicialmente o miúdo e em seguida o

graúdo. Quando as massas específicas entre os agregados forem pouco diferentes, pode-se constituir uma distribuição granulométrica com máxima densidade, pela consideração conjunta dos agregados graúdos juntamente com o miúdo considerando ainda assim, essa parcela, como o agregado graúdo.

Essa consideração poderá resultar numa dopagem do concreto, sob o ponto de vista dos agregados graúdos, com a intenção de torná-lo econômico, considerando-se um agregado deficitário e outro de boa qualidade. Essa situação é que deveria se empregar na correção do caso em que se obtém resistência mecânica e o módulo de elasticidade é baixo, realçando ambos os parâmetros.

Outro exemplo que ratifica essa situação está tratada no trabalho de Catoia e colaboradores (2008) quando então se aplicou a teoria do empacotamento de agregados graúdos e miúdos. Segundo os autores, o empacotamento dos agregados graúdos com os agregados miúdos permite determinar a mínima quantidade de areia necessária para o preenchimento existente entre as partículas maiores de pedra, possibilitando economia de argamassa e conseqüentemente de cimento. Elaborou-se um concreto, empacotando-se os agregados graúdos e miúdos com as características apresentadas na Tabela 6.

Analisando os resultados da Tabela 6 observa-se que na idade de 28 dias obteve-se a resistência mecânica de 64,3 MPa, com consumo de cimento Portland de 252 kg/m<sup>3</sup>, ou seja, necessitou-se de 3,9 kg de cimento para se obter 1 MPa. Na realidade, o que se observou foi que, houve uma grande sinergia do conjunto agregados, cimento Portland, adições, aditivo e relação água/cimento. Produziu-se, ainda assim, um concreto com consistência K = 100 mm.

Se considerado os benefícios, como um baixo calor de hidratação, pelo pouco consumo de cimento Portland, diminuição e refinamentos de poros, estabeleceu-se aí um material que ultrapassa algumas considerações previstas na ABNT NBR 6118:2007. Esses mesmos autores (CATOIA e colaboradores, 2008), em outro artigo, porém adotando outra dosagem, numa proporção cimento/total de agregados 1:6,5 e, sinergia entre materiais, obtiveram concreto autoadensável cujos resultados são apresentados na Tabela 6. As características reológicas desse concreto podem ser vistas na Tabela 7. Nota-se que, para se produzir 1 MPa, gastou-se 4,8 kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland; ainda assim, um concreto muito econômico que, se levadas em conta suas características, poder-se-ia contemplar quase toda totalidade de obras. Nota-se também que o módulo de elasticidade foi alto. Na prática, não se observa algo similar, notando-se apenas aplicações ainda tênues pela Engenharia Nacional.

**Tabela 6: Concretos elaborados com empacotamento de agregados e baixo consumo de cimento.**

Concretos Estudados			
Traço em massa	1:m	1:8,5	1:6,5
Consumo de Cimento por m <sup>3</sup> (kg)		252,0	288,5
Relação água/cimento		0,55	0,58
Cura		Úmida	Úmida
f <sub>ci</sub> (MPa)	3 dias	30,2	32,0
	7 dias	39,7	40,6
	14 dias	49,3	59,7
	28 dias	64,3	59,9
f <sub>ctj</sub> (MPa)	3 dias	2,8	3,1
	7 dias	3,8	3,3
	14 dias	4,7	4,2
	28 dias	4,9	4,2
E (GPa)	3 dias	30,0	30,3
	7 dias	38,9	32,2
	14 dias	40,8	35,9
	28 dias	44,7	39,3

Fonte: Catoia e colaboradores (2008).

**Tabela 7: Características reológicas do concreto autoadensável.**

Ensaio	Slump-Flow		Funil V	Caixa L		
	d (cm)	t <sub>50</sub> (s)	t (s)	(h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )	t <sub>20</sub> (s)	t <sub>40</sub> (s)
Concreto autoadensável	66,5	7	5	0,81	1,0	2,0
Limites	60 a 70	4 a 10	<10	≥0,8	≤1,0	≤2,0

Fonte: Catoia e colaboradores (2008).

Desta forma, escolher um cimento adequado, com a sinergia do aditivo superplastificante, num processo planejado, levando-se em conta um empacotamento de partículas (agregados), permitirá obter concretos de alta resistência mecânica, com baixa quantidade da fase CH, com uma porosidade refinada, com pouca ou nenhuma água livre, e alto desempenho.

---

## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

---

O programa experimental realizado e descrito neste capítulo visa responder às questões que motivaram este estudo, buscando-se atingir o objetivo estabelecido referente à avaliação da técnica de dopagem de agregados para uso em concretos estruturais. Este programa contempla a caracterização de todos os materiais empregados, inclusive os agregados graúdos potencialmente utilizáveis para este estudo, alguns ensaios preliminares fundamentais para alcançar o alto desempenho nas misturas, os procedimentos realizados para a dopagem dos agregados graúdos, os diversos concretos estudados e os ensaios mecânicos (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade) e microscópico (microscopia eletrônica de varredura) empregados para avaliar os concretos executados quanto à técnica de dopagem.

### 4.1. Caracterização do material

#### 4.1.1. Cimentos

Os cimentos utilizados neste estudo foram o CPIII 40 RS e o CPV ARI, cujas exigências físicas e químicas obrigatórias e facultativas atendem a especificação da ABNT NBR 5733:1991, ABNT NBR 5735:1991, ABNT NBR 5737:1991 e ABNT NBR 7215:1996. Ambos são fabricados pela Holcim do Brasil S/A.

Na escolha do cimento CPIII 40 RS levou-se em conta não somente o desempenho do material frente a meios agressivos, como também sua disponibilidade, encontrado em grande parte dos centros consumidores do Brasil. A presença da escória granulada de alto-forno na composição desse cimento é de extrema importância para a obtenção de concretos de alto desempenho, uma vez que diminui o calor de hidratação do concreto, aumenta sua resistência à compressão em idades avançadas e melhora sua trabalhabilidade, além de modificar sua microestrutura, diminuindo a permeabilidade e aumentando a durabilidade do material.

O cimento CPV ARI, também comercializado em grande parte dos centros consumidores do Brasil, foi escolhido devido ao fato de sua área específica ser considerada alta; interessante para o estudo da dopagem, já que favorece, principalmente, o processo de impregnação dos agregados. Além disso, este cimento foi extensamente estudado em diversas pesquisas anteriores realizadas pelo grupo LMABC: Melo (2000), Silva, (2000), Silva, (2002; 2007), Silva (2006) e Castro (2007).

A caracterização desses cimentos se deu por meio dos ensaios de análise química, massa específica, área específica Blaine, água da pasta de consistência normal, início e fim de pega e resistência à compressão, todos prescritos por Norma, conforme indicado no apêndice A.1.

#### **4.1.2. Agregados**

Na escolha dos agregados miúdos levou-se em conta a granulometria dos mesmos, a disponibilidade comercial na região da cidade de São Carlos e a morfologia das partículas que os compõem, pois agregados mais arredondados possuem menor área superficial e, supostamente, necessitam de menos água para molhá-los, o que pode reduzir a quantidade de água no produto final com conseqüente possibilidade de aumento na resistência mecânica e refinamento da porosidade.

As areias utilizadas neste estudo são todas do tipo quartzosas de cava retiradas de jazidas próximas da região de São Carlos. Foram caracterizadas segundo os ensaios: granulometria, diâmetro máximo característico, módulo de finura, massa específica seca, massa unitária compactada, massa unitária solta, absorção, material pulverulento e torrões de argila, prescritos por Norma, conforme indicado no apêndice A.2. A fim de melhorar o empacotamento das partículas, utilizou-se um fíler, a base de quartzo moído, que é produzido pela Mineração Jundu Ltda. e fornecido em várias granulometrias controladas, sendo utilizado neste estudo o SM500, cujas características físicas estão indicadas no apêndice A.2.

Os agregados graúdos foram escolhidos após um estudo de pesquisa, levando-se em conta a disponibilidade destes materiais. Promovidas tais identificações, foram selecionados os seguintes agregados graúdos, tidos como potencialmente utilizáveis, para a aplicação e avaliação da técnica de dopagem:

- Laterita: oriunda de jazidas localizadas no município de Santa Rita d'Oeste, as margens do Rio Grande – SP.
- Seixo rolado: comercialmente conhecido como pedregulho e proveniente da Mineradora Porto de Areia São Carlos Ltda. – SP.

### Laterita

A laterita é um material de estrutura vacuolar, muitas vezes matizado com cores variando do amarelo ao vermelho mais ou menos escuro e mesmo negro. Apresenta minerais (quartzo, mica), envolvidos por material cimentício de óxido/hidróxido de ferro, em diferentes estados de evolução. A Figura 29 mostra as lateritas utilizadas neste estudo.

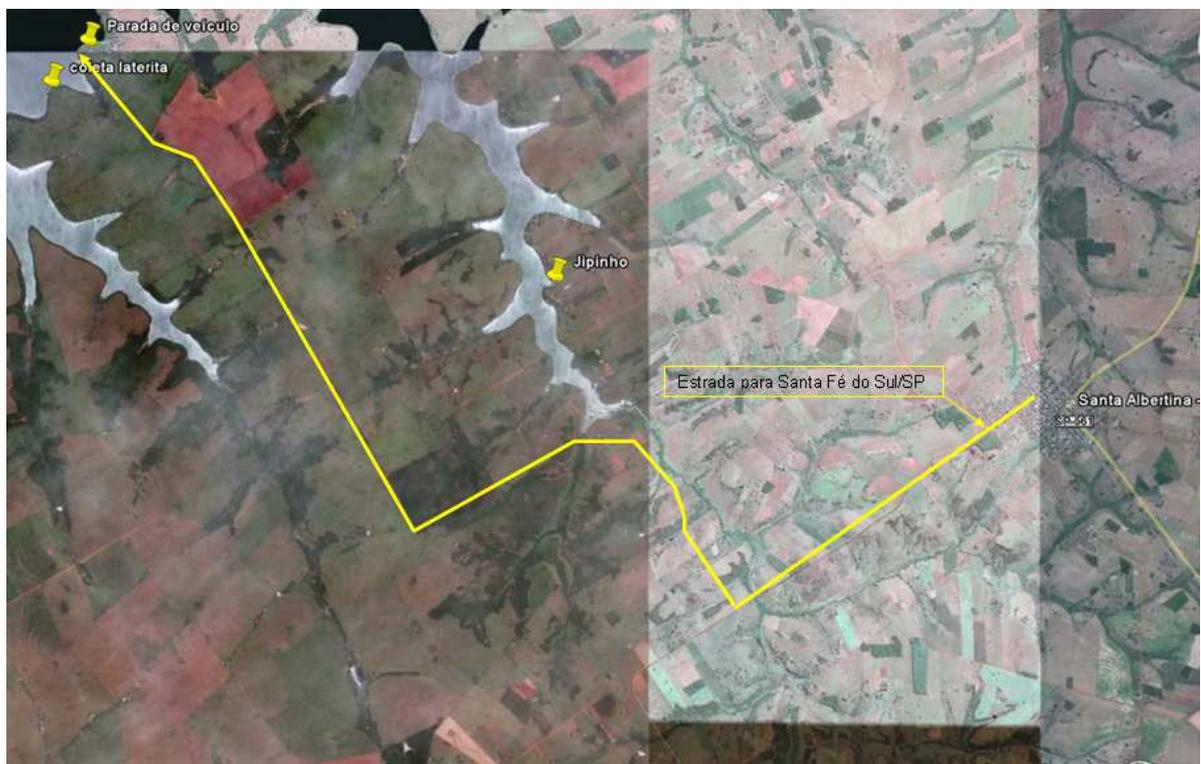


**Figura 29: Lateritas empregadas no estudo.**

O interesse pela laterita está baseado em sua textura superficial, que tem influência sobre a aderência do agregado com a pasta de cimento e também sobre a demanda de água da mistura. Pelo fato da laterita apresentar textura alveolar, caracterizada por poros e cavidades visíveis, acredita-se que a técnica de dopagem irá melhorar tanto sua ligação com a pasta de cimento quanto reforçá-la internamente. E presume-se que ocorrerá uma mudança em sua conformação superficial e em sua absorção, alterando, assim, a demanda de água da mistura. A dopagem poderá ainda selar a laterita de modo a envolver possíveis películas e torrões de argilas existentes sobre sua superfície. Essas substâncias nocivas influenciam negativamente na aderência dos grãos de laterita com a matriz de cimento e, conseqüentemente, sobre a resistência do concreto aos esforços mecânicos.

Outro fator, tão importante quanto os demais, que influenciou na escolha por esse material é a sua vasta disponibilidade, presente em cerca de 65% do território brasileiro e em regiões onde agregados tidos como convencionais (basalto, por exemplo) para a confecção de concretos estruturais não estão presentes ou então o custo para sua obtenção inviabilizaria a execução da obra.

As lateritas usadas no estudo foram coletadas de área de inundação, às margens do Rio Grande, na altura da cidade de Santa Albertina/SP, conforme localização apresentada na Figura 30. Optou-se por coletar o material desta região por motivo único de conveniência, uma vez que as mesmas já se encontravam previamente lavadas e pré-selecionadas devido à ação da água.



**Figura 30: Localização das lateritas empregadas no estudo.**

Para se ter ideia da quantidade de lateritas existentes, o local possui aproximadamente dezenas de trechos com 200 metros de extensão, com largura de 100 metros e espessura que chega a algumas dezenas de metros (Figura 31 e Figura 32).



**Figura 31: Depósito de lateritas no local de coleta.**



**Figura 32: Depósito de lateritas – destaque para a espessura da camada.**

É interessante mencionar a presença de grandes torrões de laterita encontrados na ribanceira do rio<sup>30</sup>, indicando a ocorrência de diferentes graus de intemperismo das rochas pré-existentes, conforme mostrado na Figura 33.

<sup>30</sup> A ribanceira foi formada com o represamento do Rio Grande.



**Figura 33: Presença de grandes torrões de laterita no local de coleta.**

A disponibilidade da laterita não se restringe à área mencionada, já que ao longo de todo o percurso feito para chegar ao local de coleta do material foram observados muitos outros depósitos de laterita; todos com grande potencial para uso, haja vista a quantidade significativa de laterita depositada e que pode vir a ser explorada. Alguns desses depósitos estão registrados na Figura 34.



**Figura 34: Outros depósitos de laterita na região.**

Ao empregar a laterita da forma como ela que se encontra na natureza, ou seja, retirá-la de depósitos como os mostrados anteriormente, tem-se a vantagem de aproveitar o empacotamento natural das partículas na elaboração de concretos. Isso porque, os depósitos são formados por partículas de diversas dimensões (desde agregados maiores até materiais mais finos), conforme pode ser visto na Figura 35.



**Figura 35: Depósitos contendo partículas de laterita com dimensões variadas.**

### **Seixo rolado**

O seixo rolado é um agregado de formato arredondado e superfície lisa, que apresenta coloração “terra”, conforme visualizado na Figura 36. Este agregado foi escolhido justamente pelas suas características de formato e superfície, as quais podem influenciar na aderência dos materiais e, conseqüentemente, comprometer o desempenho do concreto, além do fato de ser encontrado em abundância em regiões com escassez de rochas naturais de boa qualidade, como o noroeste do estado de São Paulo e estados do Norte e Nordeste do Brasil.



**Figura 36: Seixos rolados empregados no estudo.**

Os agregados graúdos (laterita e seixo rolado) foram caracterizados a partir dos seguintes ensaios: granulometria, diâmetro máximo característico, módulo de finura, massa específica seca, massa específica, massa unitária, absorção e material pulverulento, prescritos por Normas, conforme indicado no apêndice A.2.

### **4.1.3. Adição mineral**

Levando-se em conta a reatividade e refinamento das partículas que compõem a adição, a disponibilidade do produto no mercado e também os benefícios conferidos às misturas cimentícias, foi utilizada a sílica ativa, proveniente da fabricação de ligas de ferro-silício, da Elken Materials South America Ltda. Esse material foi caracterizado a partir de ensaio de massa específica, prescrito por Norma, e outras características relevantes foram fornecidas pelo fabricante. A caracterização da sílica está descrita no apêndice A.3.

### **4.1.4. Aditivo**

O uso de aditivo superplastificante é justificado pela necessidade de redução de água de amassamento, e conseqüente refinamento da porosidade, da calda utilizada na impregnação do agregado, repercutindo em benefícios (de resistência e durabilidade) para a mistura. Além disso, há o fato da adição mineral (sílica ativa) ser muito fina e demandar mais água que os aglomerantes utilizados em misturas convencionais.

Entre os aditivos superplastificantes existentes no mercado, dois foram pré-escolhidos para verificação de compatibilidade e teste de desempenho com os cimentos utilizados (CPIII 40 RS e CPV ARI). Estes aditivos são tradicionalmente utilizados no mercado de concreto e argamassa e vêm apresentando bons resultados em ensaios realizados pelo grupo LMABC, sendo eles: o ADVA Cast e outro (Aditivo B). Para esses aditivos foi determinado o teor de sólidos. O valor da massa específica de cada produto foi informado pelos respectivos fornecedores, conforme indicado no apêndice A.4.

## **4.2. Ensaio preliminares**

Definidos os materiais, considerou-se o processo de empacotamento de partículas de agregados e a avaliação da sinergia do aditivo superplastificante com os cimentos escolhidos para obter misturas de alto desempenho.

### 4.2.1. Empacotamento dos agregados

A determinação da composição das partículas foi realizada de modo prático e simples, utilizando o processo experimental de empacotamento dos agregados através de misturas sucessivas. Além de considerar a interação entre as partículas reais, inclusive os seus formatos e texturas superficiais, este método apresenta a vantagem de poder ser empregado em qualquer local. Este método consiste na determinação experimental da massa unitária no estado compactado seco de diferentes combinações de proporções dos dois componentes em que se deseja obter o melhor empacotamento. É um método executado em etapas sucessivas, em que cada etapa otimiza a mistura entre dois materiais ou misturas já estabelecidas. A melhor proporção entre os componentes corresponde aquela que apresentar a maior massa unitária, representando a melhor condição de preenchimento dos vazios entre as partículas e a continuidade das dimensões das partículas dos agregados com a dos aglomerantes.

A fim de exemplificar, tomam-se dois materiais denominados genericamente de Material A e Material B. Com o Material A, preenche-se no estado compactado o recipiente utilizado na determinação da massa unitária compactada, sendo utilizado neste estudo um recipiente de 3L para o estudo de agregados miúdos e um de 15 L para os agregados graúdos. O preenchimento com o Material A é feito em três camadas, recebendo cada camada 25 golpes. A superfície da última camada é nivelada e o recipiente é pesado. Determina-se a massa unitária compactada pela razão entre a massa de material compactado e o volume do recipiente. Neste estudo foi utilizada a média de três medidas, devido à variabilidade no processo de compactação.

Este procedimento é repetido com misturas dos Materiais A e B em diversas proporções. Por razões de economia de materiais pode-se reaproveitar o Material A já utilizado, acrescentando a quantidade necessária de Material B para obter a proporção desejada, sendo calculada a quantidade a ser acrescentada em cada etapa pela fórmula:

$$\Delta m_B^i = \frac{m_A}{\%_A^i} - m_A - m_B^{i-1}$$

sendo  $\Delta m_B^i$  a massa de material B a ser acrescentado na etapa  $i$ ,  $m_A$  é a massa de material A (constante durante o ensaio),  $m_B^{i-1}$  é o total de material B presente na etapa anterior e  $\%_A^i$  é a porcentagem de Material A na etapa  $i$ .

Apesar do resultado de massa unitária compactada (M.U.C.) já fornecer boa ideia do melhor preenchimento dos vazios com material sólido, a melhor forma de expressar isto é por meio do índice de vazios, que pode ser calculado conhecendo-se as massas específicas de cada material. O índice de vazios (I.V.) é a porcentagem de volume de vazios em relação ao volume total, matematicamente expresso por:

$$I.V. = 100\% - \left( \frac{\%_A}{\gamma_A} + \frac{\%_B}{\gamma_B} \right) \cdot (M.U.C)$$

sendo  $\%_A$  e  $\%_B$  as porcentagens dos materiais A e B,  $\gamma_A$  e  $\gamma_B$  as massas específicas e M.U.C. a massa unitária compactada da mistura.

O procedimento de misturas sucessivas continua após o estabelecimento do ponto ótimo de mistura entre os dois primeiros materiais. Esta mistura ótima passa a ser o Material A de uma nova etapa com um terceiro material, o qual será o novo Material B. Repetem-se todos os passos descritos acima para obtenção da melhor mistura, a qual representará uma mistura otimizada entre os três materiais presentes. Este processo pode ser repetido quantas vezes forem necessárias, sendo realizado normalmente na ordem decrescente de granulometria, de forma que os vazios restantes sejam cada vez mais preenchidos por grãos menores.

Neste estudo o processo de empacotamento de partículas foi utilizado para estimar o teor ideal de argamassa dos concretos elaborados, combinando-se proporções de areia e agregado graúdo. Além disso, optou-se por realizar o empacotamento dos agregados miúdos (dois tipos de areia) com o fíler SM500 para obter alguns traços auxiliares de concreto, conforme será visto na seção 4.4. (Dosagem dos concretos).

#### 4.2.2. Avaliação dos aditivos

Como a eficiência dos superplastificantes é controlada por parâmetros físico-químicos que não são fáceis de serem medidos, a compatibilidade dos aditivos com os cimentos foi verificada através do ensaio de miniabatimento (KANTRO<sup>31</sup> 1980 apud AÏTCIN, 2000).

---

<sup>31</sup> KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

O método do miniabatimento consiste em realizar um ensaio de espalhamento com uma pequena quantidade de pasta em um minitronco de cone padronizado, Figura 37, com o objetivo de analisar a variação de plasticidade da mistura em função do tempo, devido à variação do teor de aditivo. A composição de pasta é lançada no interior de um minitronco de cone apoiado sobre uma placa de vidro, nivelada e untada com óleo mineral. Após o preenchimento, o minitronco de cone é retirado verticalmente da base de vidro, promovendo o espalhamento da pasta sobre a base. Para cada teor de aditivo analisado, são realizadas diversas medições do espalhamento do material, a fim de estabelecer um diâmetro médio, e calculada a área de espalhamento.



**Figura 37: Ensaio de miniabatimento: espalhamento da pasta**

No ensaio de mini-abatimento é possível não só verificar o teor de saturação do aditivo como também a estabilidade da dispersão com o tempo. Não devem ser utilizadas dosagens que provoquem retardamento excessivo da pega do cimento, porém, quanto mais próximas do teor de saturação, melhor. Existem relatos de obras onde se constatou resistências finais superiores nos concretos com retardamento de pega e esse retardo é bastante provável quando se utiliza altas dosagens de aditivos superplastificantes. O inconveniente do retardamento de pega é a necessidade de maior cuidado na cura, atraso nas retiradas das fôrmas, maior probabilidade de segregação e as dúvidas quanto à qualidade do concreto que provavelmente surgem em obras onde ocorre esta situação.

No que se refere à técnica de dopagem, o retardamento de pega pode dificultar, ou até impossibilitar, o procedimento de dopagem dos agregados graúdos. Isto porque, o sucesso da técnica, além de estar na adequada escolha dos materiais e procedimento de dopagem e na correta dosagem das caldas de impregnação, está na garantia de permanência da camada de impregnação, ou pelo menos parte dela, ao redor do agregado, após mistura com os demais materiais do concreto. Neste sentido, foi realizado o ensaio de determinação do tempo de pega (Figura 38), prescrito pela ABNT NBR NM 65:2003, para avaliar a influência dos aditivos nos tempos de início e fim de pega das caldas de

impregnação (cimentos CPIII 40 RS e CPV ARI) com e sem sílica ativa (calda de alto desempenho e calda, respectivamente).



**Figura 38: Ensaio de tempo de pega realizado nas caldas de impregnação**

Com base nos resultados dos ensaios de Kanfro e tempo de pega foi possível optar pelo superplastificante que melhor atendesse as condições desejadas na dopagem, tais como a consistência da calda de impregnação e o tempo mais adequado para a mistura do agregado dopado aos demais constituintes do concreto; condições explanadas na seqüência.

### **4.3. Dopagem dos agregados**

Para melhorar o desempenho da ligação entre o agregado graúdo e a pasta de cimento foram selecionados alguns procedimentos de dopagem de modo a contemplar os principais benefícios oferecidos por cada um, a depender de cada agregado estudado. Esta seleção foi feita buscando-se valorizar a sinergia dos materiais constituintes da pasta a ser usada na impregnação dos agregados, conforme detalhado na seção 3.1. (Pasta de aglomerantes), de forma a otimizar as propriedades da mistura. Na seqüência detalham-se as formas de dopagem adotadas, a composição dos traços que foram usados para impregnação dos agregados graúdos e também o procedimento de mistura de tais traços.

### 4.3.1. Formas de dopagem

Neste estudo foram estudadas soluções com e sem sílica ativa e a capacidade de impregnação destas aos agregados graúdos selecionados. Inicialmente, pensou-se em três formas de dopagem do agregado:

(a) O agregado é impregnado em solução de água, cimento, aditivo superplastificante e sílica ativa – **calda de alto desempenho**. A homogeneização da mistura em misturadores é realizada em instantes de tempo compatíveis com as características de cada agregado<sup>32</sup>. Em seguida, são aplicados os procedimentos normais de fabricação do concreto.

(b) O agregado é impregnado em solução de água, cimento e aditivo superplastificante – **calda convencional**. Em seguida, são aplicados os procedimentos normais de fabricação do concreto.

(c) O agregado é impregnado em **solução de água e sílica ativa**. Em seguida, são aplicados os procedimentos normais de fabricação do concreto.

Antes de iniciar a dosagem das soluções de impregnação, foi necessário definir qual a forma de dopagem mais adequada para ser usada em cada agregado estudado.

No caso do seixo rolado, que é um material de superfície lisa e que apresenta baixa absorção de água (ver resultado de caracterização no apêndice A.2), o reforço da zona de transição entre a pasta e o seixo deverá ocorrer por meio da alteração de sua textura superficial, com conseqüente melhoria da aderência com a matriz cimentante, já que é muito difícil promover qualquer tipo de reforço interno neste agregado. Desta forma, pode-se dizer que a impregnação do seixo rolado em solução de água e sílica ativa provavelmente não é a melhor, ou mais adequada, forma de dopagem, já que a solução inerte de água e sílica não permanecerá aderida à superfície deste agregado após confecção do concreto. Portanto, a forma de dopagem com solução de água com sílica ativa, a princípio, foi descartada.

Para escolher entre impregnar os agregados graúdos com calda de alto desempenho e com calda convencional optou-se pela primeira justamente devido à presença de sílica ativa em sua composição. Dos vários benefícios conferidos ao uso da sílica ativa na composição de materiais à base de cimento, ressalta-se a redução da

---

<sup>32</sup> As características físicas do agregado influenciam no instante de tempo de sua homogeneização com a calda de impregnação. Os instantes de tempo foram determinados em ensaios acessórios.

permeabilidade e da porosidade na interface com o agregado; extremamente relevante para o estudo.

No caso da laterita, além da calda de alto desempenho, é interessante avaliar a solução de água e sílica ativa como impregnação. A laterita é um material de estrutura vacuolar e que apresenta alto valor de absorção de água (ver resultados de caracterização no apêndice A.2), características que favorecem a penetração de soluções para o interior do agregado. Assim, o tratamento com solução de água e sílica ativa poderá ser eficiente. Além disso, esta forma de dopagem se mostra promissora quanto à comercialização do agregado no estado dopado, já que a propriedade inerte da sílica ativa permite que as lateritas sejam estocadas e posteriormente transportadas para o local da obra.

Após tais observações, as formas de dopagem avaliadas foram resumidamente as seguintes:

- (a) Impregnação com **calda de alto desempenho**: laterita e seixo rolado.
- (b) Impregnação com **solução de água e sílica ativa**: laterita.

#### 4.3.2. Composições dos traços

Escolhidas as formas de dopagem de cada agregado gráudo estudado, foram definidos alguns parâmetros necessários para a dosagem da calda de alto desempenho, como a quantidade de água presente e a consistência desejada. Para a dosagem da solução de água com sílica ativa foi definida a proporção entre os materiais.

No caso da calda de alto desempenho, é interessante que esta apresente baixa relação  $a/agl$ , uma vez que a quantidade e o tamanho do hidróxido de cálcio presente na zona de transição estão relacionados com os poros existentes e, portanto, com a água disponível nesta região. Além disso, é importante a adição de um material finamente dividido, como a sílica ativa de ferro-silício, pois a adição leva à diminuição da relação água/sólidos da pasta, o que implica em menor porosidade total e também um refinamento do sistema de poros e dos produtos da hidratação.

O grupo LMABC possui uma gama muito grande de informações no seu banco de dados sobre pastas, argamassas e concretos de alto desempenho confeccionados com sílica ativa de ferro silício e baixa relação  $a/agl$ .

A escolha do sistema cimentício formado pelo cimento+sílica ativa, assim como a do cimento Portland, foi adotada apoiada nos estudos de Melo (2000), Silva, (2000), Castro

(2007), Silva, (2002; 2007) e Silva (2006) que envolveram o efeito da cura térmica, características mecânicas e de durabilidade, reologia e também a microestrutura das pastas, argamassas e concretos. Com isso, procura-se ilustrar a conveniência de adotar um sistema cimentício com grande conhecimento anterior.

Com o uso de sílica ativa e baixa relação  $a/agl$ , faz-se necessário o uso de aditivo superplastificante na mistura, uma vez que a calda de alto desempenho deve apresentar consistência tal que permita cobrir completamente, e de modo eficiente, todos os grãos de agregados graúdos, bem como a superfície destes.

Para elaborar a solução de água com sílica ativa foram avaliadas visualmente misturas de diferentes teores de sílica ativa dispersos em determinado volume de água. Optou-se por não estudar misturas contendo elevado teor de sílica, visto que o custo deste material é cerca de duas vezes maior que o do cimento Portland; o que inviabilizaria a aplicação da dopagem.

#### 4.3.3. Procedimentos de mistura

A seguir são descritos tanto os procedimentos de mistura usados para elaborar a calda de alto desempenho e a solução de água e sílica ativa quanto os procedimentos usados para homogeneizar as soluções de impregnação com os agregados graúdos, dopando-os.

O estudo do procedimento de mistura empregado nas caldas de alto desempenho é necessário uma vez que as propriedades reológicas das caldas no estado fresco são bastante influenciadas pela seqüência do processo de mistura escolhido. O procedimento usado neste estudo teve como base o estudo desenvolvido por CASTRO (2007), cujos detalhes relativos à variação da ordem de colocação dos materiais constituintes encontram-se na seção 3.1.3. (Aditivo superplastificante). Além disso, levou-se em consideração que a fluidez de pastas de cimento pode ser melhorada com a adição atrasada de superplastificante, pelo fato do teor de  $C_3A$ , que é responsável pela redução da fluidez de pastas de cimento, ser reduzido durante os 10 primeiros minutos de hidratação e porque a absorção de aditivo sobre o  $C_3S$  e  $C_3A$  não hidratados é maior do que os mesmos para as fases hidratadas (AIAD<sup>33</sup>, 2003 apud CASTRO, 2007). Desta forma, julga-se que em um tempo máximo de 20 minutos é perfeitamente possível promover a mistura homogênea dos

---

<sup>33</sup> AIAD, I. Influence of time addition of superplasticizers of the rheological properties of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 8, p. 1229-1234, Aug. 2003.

materiais, sendo que os 10 primeiros minutos, contados do contato do cimento com a água, são reservados para a redução do teor de  $C_3A$  pela hidratação. As caldas de alto desempenho foram preparadas em misturador mecânico, conforme Figura 39.



**Figura 39: Calda de alto desempenho preparada em misturador mecânico.**

Antes de iniciar o procedimento de mistura da solução de água e sílica ativa deve-se considerar que a sílica apresenta valor muito baixo de massa unitária, variando entre  $200 \text{ kg/m}^3$  e  $700 \text{ kg/m}^3$ , e que associado à pequena dimensão das partículas pode fazer com que o material apresente problemas de manuseio e transporte. Para contornar essa problemática, a sílica ativa é submetida a um processo de densificação, de modo que suas partículas se encontram fortemente unidas. Entretanto, este processo pode resultar em aglomerados macroscópicos que não se rompem com facilidade mesmo após cisalhamento intenso, prejudicando o aumento da compacidade de composições cimentícias e/ou a resistência devido à sua atividade pozzolânica e à sua atuação como fíler promovida por sua granulometria muito fina. Esses efeitos só são alcançados caso a sílica ativa se encontre desaglomerada e dispersa, expondo assim toda a sua superfície reativa, além de possibilitar que suas partículas preencham os espaços vazios no empacotamento (ROMANO e colaboradores, 2008).

Exposto isso, a elaboração da solução de água com sílica ativa seguiu um procedimento simples, mas que envolveu a tentativa de aproveitamento máximo do potencial da adição. Com o uso de um disco de aço giratório (Figura 40) a sílica ativa foi misturada com a água, procurando promover, ao mesmo tempo, a defloculação dos grãos.



**Figura 40: Disco giratório usado no preparo da solução de água e sílica ativa.**

O procedimento de mistura usado para dopar os agregados graúdos se deu com a homogeneização do agregado nas soluções de impregnação previamente preparadas. Pereira (2010) afirma que um procedimento eficaz e recomendado pelo grupo LMABC para se atingir a máxima dispersão dos materiais finos é lançar primeiro no misturador os agregados graúdos, que neste estudo são os agregados a serem dopados, e adições minerais e parte da água de amassamento e misturá-los por cerca de 3 minutos. Dessa forma há uma boa dispersão das adições e também um contato mais íntimo destas com os agregados, o que melhora a zona de transição do agregado com a pasta. Este procedimento poderia ser perfeitamente utilizado para dopar o seixo rolado, que é um agregado resistente. Entretanto, para o caso da laterita, que é um agregado mais frágil, este procedimento provavelmente alteraria suas características físicas.

Com base no exposto, os instantes de tempo de homogeneização dos materiais foram compatíveis com as características de cada agregado e caracterizados a partir da observação visual do comportamento do agregado quando lançado no misturador, levando-se em consideração suas características físicas (forma, textura superficial, mineralogia, resistência mecânica e absorção), de maneira que não ocorresse alteração do agregado (granulometria, por exemplo) e/ou da calda (consistência).

O procedimento usado na dopagem de agregados friáveis e de baixa resistência, seja com calda de alto desempenho ou com solução de água e sílica ativa, incluindo seqüência e tempo, deve ser muito bem avaliado. O procedimento de mistura pode levar ao desgaste prematuro do material, ou até mesmo à sua ruptura, com conseqüente alteração de sua granulometria, caso haja a mistura por longos períodos de tempo. Uma solução simplista, porém eficiente, para contornar a problemática da dopagem desses agregados é promover uma mistura descontinuada, ou seja, o misturador é acionado em intervalos de tempo espaçados, de modo que não ocorra a fragmentação do material e que, ao mesmo tempo, promova sua adequada dopagem.

Quando a dopagem for feita com calda de alto desempenho deve-se tomar cuidado quanto à quantidade de água que o agregado vai absorver caso seja utilizado em condição seca, influenciando na água da região de interface pasta/agregado, principalmente quando se trata de agregados com alta absorção, como a laterita. Se o agregado for misturado em condição seca, admite-se que seja absorvida água da mistura em quantidade suficiente para levar o agregado à condição saturada superfície seca<sup>34</sup>, e esta água não está incluída na água de mistura, podendo prejudicar a reologia da pasta e/ou a hidratação do cimento. No entanto é possível que as partículas sejam rapidamente envolvidas com pasta de cimento que impede o ingresso da água necessária à saturação. Como resultado, a relação a/agl efetiva é maior do que seria no caso em que fosse possível a total absorção de água pelo agregado. Este efeito é significativo principalmente nas misturas ricas, em que pode ocorrer rapidamente o recobrimento do agregado; em misturas pobres, com muita água, a saturação do agregado se processa normalmente (NEVILLE, 1997).

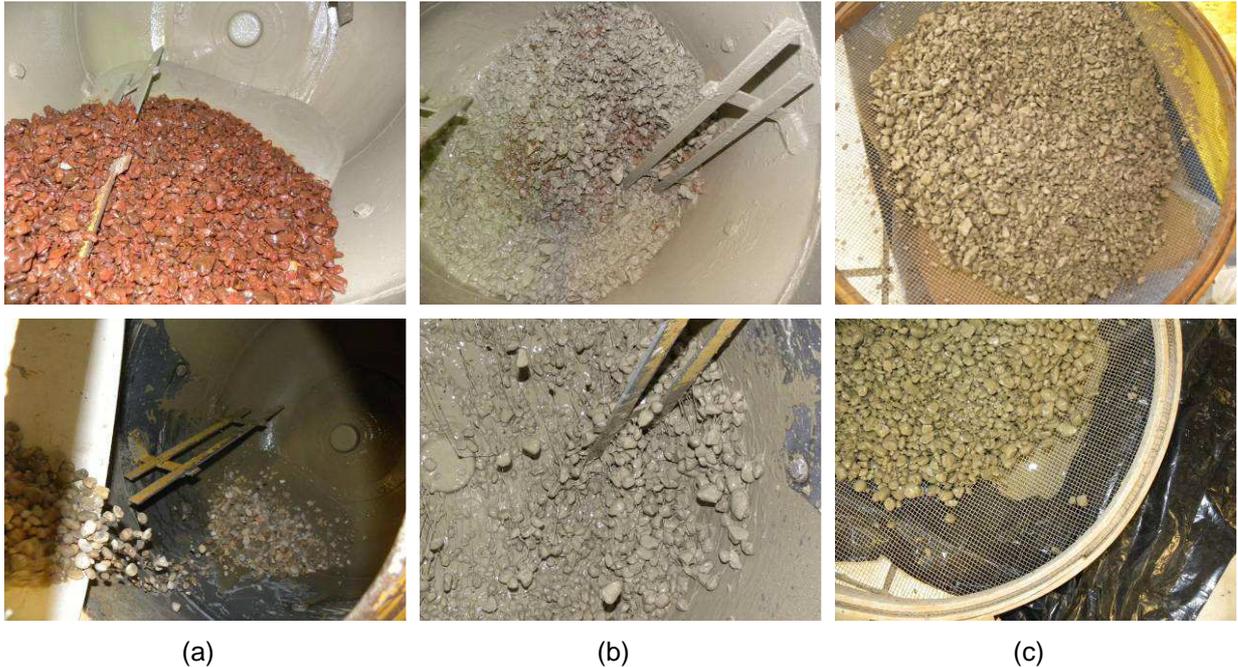
Com base no exposto, optou-se por impregnar a laterita quando esta se encontrava em condição saturada superfície seca. Já no caso do seixo rolado, o procedimento de mistura com calda de alto desempenho não necessitou de cuidados específicos, uma vez que o seixo não possui a característica de ser friável e não influencia na água de mistura.

Após ter sido preparada a calda de alto desempenho, os agregados foram misturados a ela e homogeneizados. Este processo de dopagem foi finalizado removendo-se o excesso da calda, com auxílio de uma peneira de abertura de malha igual a 1,20 mm, de modo que todas as partículas ficassem envolvidas pela calda e o volume excedente fosse separado. É fundamental que o volume de calda excedente não seja somado ao da pasta do concreto para não falsear os resultados comparativos entre o concreto controle e o dopado. As etapas do procedimento de dopagem com calda de alto desempenho são mostradas na Figura 41. Em seguida, os agregados dopados foram cobertos com saco plástico (Figura 42) e acondicionados em câmara úmida até o momento da confecção do concreto, evitando perda de umidade e comprometimento do processo de dopagem.

O tempo de acondicionamento e repouso do agregado dopado com calda foi definido com base nos resultados do ensaio de tempo de pega da calda de impregnação, conforme serão vistos na seção 5.2.2. (Avaliação dos aditivos). Com isso, espera-se garantir que a camada de impregnação permaneça aderida ao agregado após sua mistura com os demais materiais do concreto.

---

<sup>34</sup> O agregado é dito estar na condição saturada superfície seca (SSS) quando todos seus poros permeáveis estão preenchidos e não há um filme de água em sua superfície. Ou, segundo a ABNT NBR NM 30: 2001, p.1, o agregado saturado com superfície seca é aquele cuja partícula absorveu o máximo de água apresentando ainda a superfície seca.



**Figura 41: Etapas da dopagem com calda de alto desempenho, exemplificadas para a laterita (linha superior) e para o seixo rolado (linha inferior): (a) lançamento dos agregados na calda; (b) homogeneização da mistura; (c) remoção do excesso da calda.**



**Figura 42: Agregados dopados com calda de alto desempenho e cobertos com saco plástico: laterita (à esquerda) e seixo rolado (à direita).**

Para comprovar o efeito benéfico da calda de alto desempenho quanto à porosidade do agregado, mais especificamente para o caso do agregado laterítico, foi realizado o ensaio de Determinação da Porosidade aplicando-se a técnica de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM).

A porosimetria de mercúrio permite a determinação, além do volume de poros abertos, da distribuição de poros presentes no corpo ensaiado. Esta técnica apresenta, todavia, o inconveniente de fornecer resultados associados à toda a porosidade aberta, independente dos poros serem interconectados (permeáveis) ou não.

Trata-se de um método de medição da quantidade e tamanho dos poros baseado no princípio de que um líquido que não molhe um sólido poroso, somente irá entrar nos poros sob pressão (Taylor, 1997), sendo que a pressão  $p$  necessária para intrudir o líquido nos poros do sólido é dada pela equação de Washburn, tomando os poros como cilíndricos, conforme segue:

$$p = -4\gamma \cos\phi / d$$

onde:

$p$  = pressão de intrusão, em ou N/mm<sup>2</sup>, cujos valores típicos estão em torno de 400 N/mm<sup>2</sup> para poros com diâmetro abaixo de 3,5 nm;

$\gamma$  = tensão superficial do líquido, em N/m (para mercúrio Hg ~ 0,483 N/m);

$\phi$  = ângulo de contato entre o mercúrio e a amostra, em graus (valores entre 117 e 140°);

$d$  = diâmetro do poro.

Os resultados dos ensaios de PIM normalmente são expressos, basicamente, na forma de porosidade total, isto é, volume total acumulado de mercúrio intrudido, e na forma de curvas de distribuição de tamanho de poros, onde, normalmente, são desenhados gráficos com o diâmetro do poro no eixo das abscissas e o volume acumulado de mercúrio no eixo das ordenadas. A partir da pressão de intrusão registrada é obtido o diâmetro do poro pela equação de Washburn.

Na literatura, encontram-se largamente difundidas as análises de PIM através da curva de distribuição granulométrica, do diâmetro limite ou diâmetro crítico de poro<sup>35</sup> e da porosidade total.

No presente estudo, as análises de porosimetria foram desenvolvidas em porosímetro da marca Micromeritics, modelo Porosizer 9320, no Centro de Ciências e Tecnologia do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

---

<sup>35</sup>Diâmetro crítico de poro refere-se ao tamanho de diâmetro abaixo do qual ocorre um volume de intrusão de mercúrio na amostra muito pequeno e um grande volume de intrusão para poros com tamanho superior (Mehta e Manmohan, 1980).

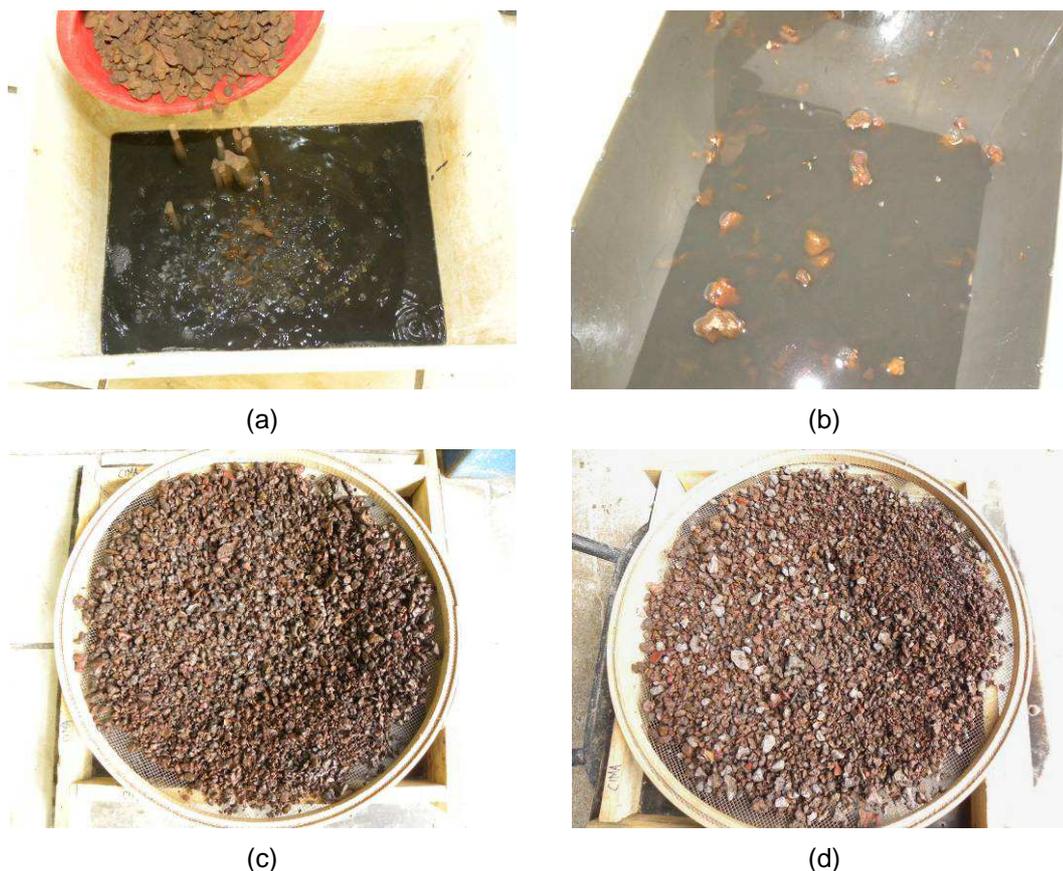
Os ensaios de porosimetria de imersão foram realizados em duas amostras, sendo a primeira amostra representada por um grão de laterita em seu estado natural e a segunda por um grão de laterita em estado dopado (curado em câmara úmida por 28 dias). As amostras foram submetidas à secagem que constou de imersão em álcool isopropílico por um período de 24h, pesagem das amostras e secagem em estufa a 60°C até constância de massa. Após este período as amostras foram embaladas em sacos plásticos, seladas e acondicionadas em dessecadores até a realização do ensaio.

Os resultados deste ensaio comprovam a eficiência da técnica de dopagem na redução da porosidade do agregado laterítico, conforme será visto na seção 5.3.2. (Procedimentos de mistura).

No caso da dopagem com solução de água e sílica ativa, o cuidado no procedimento de mistura se refere ao tempo que o agregado deve ficar em solução para sua adequada impregnação, principalmente quando a absorção deste agregado é significativa, como no caso da laterita. Devido a isto, foi fundamental realizar um estudo da velocidade do comportamento de absorção de água pelo agregado laterítico, em relação ao tempo. Este estudo permitiu determinar os tempos, mínimo e máximo, de imersão da laterita na solução para que o valor de absorção se estabilizasse, conforme descrito na seção 5.3.2. (Procedimentos de mistura).

Esse mesmo tempo foi usado na saturação da laterita com água (para posterior impregnação com calda de alto desempenho). Em seguida, obteve-se a condição saturada superfície seca dos agregados mediante exposição e secagem ao ar.

A Figura 43 mostra as etapas do procedimento de dopagem com solução de água e sílica ativa. Ao longo da etapa b), que correspondeu ao tempo de imersão da laterita, a solução foi contínua e manualmente misturada para que a adição não se decantasse.



**Figura 43: Etapas da dopagem com solução de água e sílica ativa, exclusivas da laterita: (a) lançamento dos agregados na solução; (b) agregados imersos; (c) remoção do excesso da solução; (d) secagem ao ar para obtenção da condição saturada superfície seca.**

Conforme mencionado anteriormente, Pereira (2010) descreve uma seqüência de mistura para se atingir a máxima dispersão dos materiais finos e que pode ser aplicada sem problemas para agregados resistentes. Dito isso, outra opção para dopar o seixo rolado seria a de realizar o procedimento de dopagem conjuntamente com a confecção da calda de alto desempenho. Neste caso, uma das possíveis seqüências de lançamento dos materiais seria:

- Adição de agregado graúdo e sílica ativa e homogeneização por 1 minuto.
- Adição de 10% da água de amassamento e homogeneização dos materiais por 2 minutos.
- Adição do cimento e 90% da água de amassamento, com homogeneização dos materiais por mais 3 minutos.
- Repouso de 10 minutos. Adição do aditivo superplastificante e homogeneização final por 4 minutos, totalizando 20 minutos de mistura.

Ao lançar primeiro no misturador os agregados graúdos e adições minerais e parte da água de amassamento e misturá-los por cerca de 3 minutos, o próprio choque das partículas maiores dos agregados promove a defloculação do material cimentante e, desta forma, há uma melhor dispersão das adições e também um contato mais íntimo destas com os agregados, o que melhora a zona de transição do agregado com a pasta. Além disso, a mistura do agregado graúdo com a sílica ativa pode auxiliar em sua dopagem interna (reforço).

As etapas mostradas na Figura 44 referem-se ao procedimento alternativo de dopagem recomendado somente para agregados de boa resistência e que não foi aplicado neste estudo por razões comparativas de resultados. Os numerais cardinais estão na seqüência de colocação dos materiais.



**Figura 44: Etapas conjuntas dos procedimentos de mistura dos materiais da calda de alto desempenho e dopagem dos agregados graúdos.**

#### 4.4. Dosagem dos concretos

Apresenta-se, nesta seção, a composição dos traços de concreto executados com os diferentes tipos de agregados avaliados (laterita e seixo rolado) e o procedimento de mistura adotado para tais traços.

Os traços de concreto, tanto os confeccionados com laterita quanto os com seixo rolado, foram executados em misturador mecânico em volume compatível para a moldagem dos diversos corpos de prova referentes a todos os ensaios de caracterização (mecânico e microestrutural).

No propósito de não ampliar as variáveis envolvidas durante o estudo de dosagem dos concretos, foram tomados alguns cuidados quanto aos materiais utilizados:

- dentro das possibilidades, foram utilizados os mesmos lotes de cimentos, agregados, aditivos e sílica ativa, a fim de se evitar problemas decorrentes de mudança de lotes;
- buscou-se, à medida do possível, o menor índice de vazios nas proporções entre os agregados miúdos e graúdos, visando à maior compacidade do concreto;
- manteve-se uma consistência constante para os concretos em  $120 \pm 20$  mm, julgada compatível com um adequado lançamento e adensamento, que foi medida pelo abatimento do troco de cone (ABNT NBR NM 67:1998);
- a máxima relação água/cimento, igual a 0,65, não foi ultrapassada, por recomendações da ABNT NBR 6118:2007, quanto à durabilidade do concreto, considerando classe de agressividade ambiental I.

Os traços de concreto foram elaborados, em massa, 1:m (cimento:total de agregados) e utilizando-se o cimento Portland CPIII 40 RS. Escolheu-se trabalhar com dois tipos de agregado graúdo com características distintas, sendo um frágil, poroso e com textura rugosa (laterita) e outro resistente e com textura superficial lisa (seixo rolado). Para cada tipo de agregado foram confeccionados dois concretos, a saber:

- **Controle:** concreto confeccionado com agregados graúdos em seu estado natural, ou seja, os agregados não receberam o tratamento de dopagem.
- **Dopado:** concreto confeccionado com agregados graúdos que receberam um dos três procedimentos de dopagem descritos na seção 4.3.1. (Formas de dopagem).

O concreto controle se justifica pelo caráter comparativo dos vários ensaios mecânicos e microestruturais.

#### **4.4.1. Traços de concreto controle**

No caso do seixo rolado, foram estudados três traços de concreto controle, sendo um pobre (1:7,5), um médio (1:5,5) e um rico (1:3,5). Em nenhum desses traços houve uso de aditivo superplastificante ou de sílica ativa, justamente para avaliar apenas o efeito da técnica de dopagem no comportamento de tais concretos. Por menor que fosse o teor de aditivo utilizado, este causaria dispersão das partículas de cimento, melhorando as propriedades mecânicas do concreto, inclusive sua resistência à compressão, e os efeitos pozolânico e fíler da sílica ativa também provocariam alterações benéficas ao concreto. Desta forma, como parâmetros adotaram-se apenas as recomendações de durabilidade da norma ABNT NBR 12655:2006 referentes à menor classe de agressividade ambiental (Classe I). Estas recomendações prescrevem uma resistência característica a compressão ( $f_{ck}$ ) mínima de 20 MPa aos 28 dias de idade, consumo de cimento mínimo de 260 kg/m<sup>3</sup> e relação a/c máxima de 0,65. Além disto, a consistência e o teor de argamassa das misturas foram observados conforme recomendações de Helene (2005).

O teor ideal de argamassa foi definido no traço médio (1:5,5), combinando proporções de areia e seixo rolado, ou seja, empacotando-os. Ao combinar esses dois agregados, consegue-se determinar a mínima quantidade de areia necessária para o preenchimento existente entre as partículas maiores de seixo rolado, possibilitando, desta forma, economia de argamassa e, conseqüentemente, de cimento. Assim, o teor ideal de argamassa utilizado partiu da proporção entre os agregados graúdos e miúdos determinada no empacotamento. Após a mistura dos materiais foi verificado visualmente se o teor de argamassa estava adequado e, conforme a necessidade, feito o ajuste. Uma vez determinado o teor de argamassa ideal para o traço médio (1:5,5), este foi mantido para os traços pobre (1:7,5) e rico (1:3,5).

O ajuste da relação a/c, para cada traço de concreto, foi feito com auxílio do ensaio de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998), realizado logo após a mistura dos materiais em misturador mecânico, mantendo-se a consistência constante e igual a 120 ± 20 mm. Os valores de relações a/c determinados para os traços de concreto controle foram mantidos para os respectivos traços de concreto dopado, justamente para fins comparativos.

No caso da laterita, optou-se por elaborar inicialmente traços exploratórios visando avaliar o efeito de alguns parâmetros, como, por exemplo, empacotamento de partículas, uso de aditivo superplastificante e uso de sílica ativa, no comportamento dos concretos lateríticos. Estes traços, denominados de complementares, foram elaborados com consumo de cimento em torno de  $320 \text{ kg/m}^3$ , teor comumente empregado, e com relações a/c ajustadas para manter a consistência constante e igual a  $120 \pm 20 \text{ mm}$ .

Por ter apenas objetivo exploratório, os traços lateríticos complementares foram executados em pequeno volume em misturadora de mesa (argamassadeira com misturador adaptado para concreto). O volume foi suficiente para realizar o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone – “slump test” – (ABNT NBR NM 67:1998) – e posteriormente a moldagem de quatro corpos de prova cilíndricos  $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ . Optou-se por romper dois corpos de prova à compressão e dois à tração por compressão diametral na idade de 28 dias, sendo que as amostras para análise microestrutural foram obtidas do corpo de prova rompido à tração.

Após análise dos traços complementares, outros três traços controle foram confeccionados com a laterita, a saber: um pobre (1:6,5), um médio (1:5,0) e um rico (1:3,5). Estes traços foram elaborados com empacotamento de partículas e aditivo superplastificante, mantendo-se a consistência constante e igual a  $120 \pm 20 \text{ mm}$ . Os valores de relações a/c determinados para os traços de concreto controle também foram mantidos para os respectivos traços de concreto dopado, para fins comparativos.

#### **4.4.2. Traços de concreto dopado**

Buscando-se avaliar o comportamento da técnica de dopagem, os concretos dopados foram confeccionados com a mesma dosagem usada nos respectivos traços de concreto controle, mantendo-se os valores de teor ideal de argamassa e de relações a/c independente da consistência obtida. A diferença primordial na dosagem dos concretos dopados está no uso do agregado graúdo em estado dopado, cujos procedimentos de dopagem encontram-se detalhados na seção 4.3.3. (Procedimentos de mistura).

Para analisar a permanência da camada de impregnação ao agregado, optou-se pelo estudo dos concretos com seixo rolado, no traço 1:7,5. A superfície lisa do seixo consiste na situação menos favorável quanto à permanência da impregnação e o traço pobre provavelmente evidenciará o efeito da impregnação. Desta forma, foram elaborados dois traços de concreto com seixo rolado dopado: um confeccionado quando a impregnação

estava próxima de atingir seu início de pega e outro logo após a impregnação ter atingido 24 horas contadas do contato do cimento com a água. A Figura 45 apresenta os seixos rolados usados na confecção dos concretos com dopagem em início de pega da calda de impregnação e após 24 horas de impregnação.



**Figura 45: Seixo com impregnação em início de pega (à esquerda) e após 24 horas de impregnação (à direita).**

Visualmente pode-se perceber que os agregados cuja impregnação tenha ocorrido há 24 horas (Figura 45 à direita) encontram-se superficialmente secos e na forma de torrões, com partículas aderidas umas as outras. As partículas podem ser facilmente desagregadas ao inseri-las em misturador mecânico, podendo ser posteriormente ensacadas e comercializadas. No entanto, este processo não é recomendado, já que a energia envolvida é grande e pode levar à alteração das características do agregado ou ao próprio comprometimento da dopagem.

A escolha pela impregnação em início de pega ou com 24 horas foi feita com base no melhor desempenho conferido ao concreto, conforme será visto no capítulo seguinte. A impregnação escolhida foi aplicada aos concretos com laterita.

#### **4.4.3. Procedimentos de mistura**

Os procedimentos de mistura adotados para os concretos incluem seqüência de colocação dos materiais e tempo de homogeneização no misturador mecânico. Os traços de concreto controle foram confeccionados segundo seqüência baseada em prática do grupo LMABC e os traços de concreto dopado foram confeccionados seguindo uma ordem de mistura diferenciada. É importante dizer que as seqüências de mistura dos traços controle e

dopado, não têm que ser, necessariamente, as mesmas para validar a comparação dos resultados, uma vez que os traços dopados incorporam tecnologia diferenciada.

A confecção dos concretos dopados só ocorreu após a certificação de permanência da camada de impregnação, ou pelo menos parte dela, ao redor do agregado, ou seja, após definido o melhor instante de mistura do agregado dopado ao concreto (início de pega ou 24 após a impregnação). Esta certificação é de extrema importância, pois durante a confecção do concreto, ou durante o próprio manuseio do agregado dopado, a solução de impregnação pode se dispersar, comprometendo a melhoria na zona de transição pasta/agregado.

Logo após a confecção dos concretos, foi feito o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67:1998) que tem como objetivo avaliar a consistência do concreto e verificar a ocorrência de segregação e exsudação. A massa específica do concreto fresco foi obtida de acordo com a ABNT NBR 9833:2008, utilizando um recipiente de 10 dm<sup>3</sup> e um vibrador de agulha de 25 mm de diâmetro. Em seguida, foram moldados os corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm de acordo com a ABNT NBR 5738:2003, sendo posteriormente protegidos com sacos plásticos para evitar perda de umidade. A desenforma dos corpos de prova foi realizada 24 horas após a moldagem. A cura ocorreu em câmara úmida, de acordo com a ABNT NBR 5738:2003, até a data de ensaio.

#### **4.5. Preparação de amostras microestruturais**

A preparação de amostras de concreto foi realizada no Laboratório de Materiais Avançados à Base de Cimento – LMABC/SET/USP, o qual dispõe de infraestrutura, materiais e equipamentos específicos para o preparo de amostras de materiais à base de cimento. A técnica utilizada nesta preparação baseou-se no método desenvolvido pelo Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio e pelo Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo em 1998 – 2002, em um laboratório de preparação de amostras no LMABC (Figura 46). Este método de preparação de amostras foi comprovado pelos diversos trabalhos subseqüentes ao de Melo (2000) e que produziram resultados coerentes com os materiais ensaiados.



**Figura 46: Vista da sala de preparação de amostras do LMABC**

A primeira etapa da preparação consistiu em extrair um prisma com 2 cm x 2 cm x 20cm de dimensão de um corpo de prova a ser analisado, rompido à tração por compressão diametral. Nesta fase foi imprescindível o uso de ferramentas que não alterassem a natureza da amostra. O corte dessas amostras aconteceu em duas etapas. Na primeira etapa foram retiradas amostras com dimensões maiores (a menor dimensão ficou em torno de 3 cm), a partir de máquinas de serra portátil, tipo Makita® (Figura 47a) ou outras similares. Pelo fato do tamanho das amostras de concreto se restringir ao tamanho do porta amostra do microscópio, o corte final foi realizado por máquina com discos com cortes diamantados, sempre umedecido com álcool isopropílico e com controle do esforço cortante sobre a amostra (Figura 47b).

As amostras, a partir das quais se obtiveram as fotomicrografias, foram do tipo fraturada e do tipo polida. As amostras fraturadas apresentam as reais características do concreto, principalmente em relação às interfaces e as diferenças entre as diversas fases a serem investigadas. E as amostras polidas possibilitam observar as várias fases das pastas de cimento pelo nível de tonalidade cinza da imagem. As amostras fraturadas foram obtidas após o corte com dimensões aproximadas das especificadas, promovendo-se a fratura das mesmas com auxílio de ferramentas cortantes manuais. A partir dessa fase não houve mais o contato manual direto com as amostras, passando a se adotar o manuseio com a utilização de pinças.

Após o corte, a segunda etapa de preparação das amostras foi a limpeza das mesmas, promovida com o uso de um equipamento de ultrassom resfriado em álcool isopropílico durante 20 minutos, para remoção de partículas soltas e outras possíveis sujidades oriundas do processo de corte e fratura (Figura 47c).

A preparação teve como próxima etapa, para a interrupção da hidratação e a dessecação das amostras, uma seqüência de vácuo (Figura 47d) e agitação em álcool

isopropílico por meio de um agitador magnético (Figura 47e). Esta seqüência consistiu em primeiramente, submeter as amostras à 5 minutos de vácuo a uma pressão de 60 mm Hg e, em seguida a 15 minutos de agitação magnética, a temperatura ambiente, com a amostra imersa em álcool isopropílico. No total, foram, alternadamente, quatro seqüências de vácuo e três seqüências de agitação magnética. A interrupção da hidratação da amostra é necessária para que se possa caracterizar o material de acordo com a idade desejada, no caso 28 dias. Já a dessecação é importante, pois a obtenção das micrografias é feita em câmara de vácuo com equipamentos extremamente sensíveis que podem ser danificados com a evaporação da água capilar (LIMA, 2008).

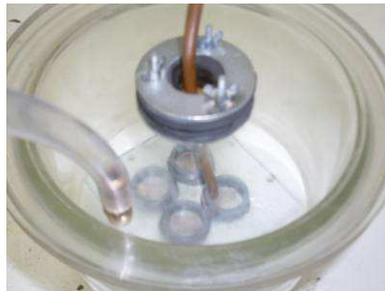
A última etapa da preparação de amostras consistiu em deixá-las numa estufa a 60° C por 24 horas (Figura 47f) antes de realizar os ensaios microscópicos. A temperatura da estufa não deve ultrapassar os 60° C para evitar qualquer dano à microestrutura do concreto. Há que se tomar cuidados especiais quanto à limpeza da estufa, sendo recomendáveis estufas em aço inoxidável para este procedimento.



**Figura 47: Etapas de preparação das amostras de concreto**

Em se tratando de pesquisas que procuram identificar o grau de hidratação e a morfologia dos produtos de hidratação do cimento Portland por meio de ensaios de microscopia eletrônica de varredura, Diamond (2004) recomenda que as amostras sejam polidas e cobertas com resina epoxídica. Desta forma, no caso das amostras polidas, logo após a secagem, fez-se sua impregnação sob vácuo e embutimento a frio com resina para

preencher a estrutura dos poros, preservando-os durante o polimento (Figura 48a). Após 24 horas da impregnação da resina, fez-se o lixamento das amostras usando lixas de carvão de silício, na seqüência: 320, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 2000 (Figura 48b) e o polimento final com pasta de diamante. Após o polimento, as amostras foram novamente limpas com aplicação de ultrassom.



a) embutimento de amostras polidas



b) lixamento de amostras polidas

**Figura 48: Etapas finais de preparação das amostras polidas**

Após todos os procedimentos ora descritos, as amostras foram devidamente acondicionadas em sacos plásticos totalmente secos e esterilizados, lacrados e guardadas em local fresco, protegidos de luz solar e umidade, preferencialmente em recipientes do tipo dessecadores (Figura 49) com vácuo e sílica gel até o dia de ensaio.

**Figura 49: Armazenamento das amostras**

Antes de serem analisadas no microscópio eletrônico de varredura todas as amostras foram coladas no porta amostra com tinta condutora (tinta prata), para assegurar o aterramento e recobertas com uma fina camada condutora de ouro, conforme Figura 50.



Figura 50: Colagem com tinta prata e recobrimento com ouro

#### 4.6. Avaliação das propriedades mecânicas

A resistência à compressão é comumente empregada como critério para a avaliação do desempenho dos concretos convencionais, bem como dos concretos de elevado desempenho. Assim, para correlacionar a resistência à compressão às demais propriedades, foram ensaiados quatro corpos de prova na compressão axial simples, conforme a ABNT NBR 5739:2007, com velocidade de carregamento constante e igual a 0,6 MPa/s. A resistência à compressão de cada corpo-de-prova foi obtida dividindo sua carga de ruptura pela área da sua seção transversal. A resistência em cada idade foi obtida pela média aritmética dos resultados dos quatro corpos-de-prova ensaiados. Foram avaliadas as idades de 7, 28, 63 e 91 dias. Após a aplicação da carga nos corpos-de-prova, verificou-se a correta distribuição de tensões durante o ensaio de compressão axial simples, pela forma cônica de ruptura apresentada pelos corpos-de-prova ensaiados.

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado conforme o prescrito na ABNT NBR 7222:2011, utilizando velocidade de carregamento constante e igual a 0,06 MPa/s. Da mesma maneira que para o ensaio de compressão axial simples, a resistência à tração por compressão diametral em cada idade foi determinada através da média aritmética dos resultados dos três corpos de prova ensaiados. Foram avaliadas as idades de 28 e 63 dias.

A resistência à tração do concreto foi avaliada também pelo ensaio de resistência à tração na flexão. Este ensaio foi realizado na idade de 28 e 63 dias para os concretos controles e dopados, em corpos de prova prismáticos de 10 cm x 10 cm x 35 cm, sendo três corpos de prova para cada idade. O ensaio foi realizado em prensa ELE, com aplicação de carga nos terços do vão e velocidade de carregamento de 0,2 kN/s (0,09 MPa/s). Após a ruptura mediu-se as dimensões na seção fraturada para cálculo da resistência à tração.

Pelo fato da estabilidade dimensional dos concretos estar relacionada ao alto módulo de elasticidade, entre outros fatores, foram realizados ensaios para determinação do módulo de elasticidade com extensômetros elétricos de resistência, (segundo o plano II de carga da ABNT NBR 8522:2008 - Determinação do módulo de deformação elástica e diagrama tensão deformação) nas idades de 28 e 63 dias. Para cada idade estudada, foram ensaiados três corpos-de-prova.

Para se ter uma ideia da porosidade dos concretos elaborados, realizou-se o ensaio de absorção de água por imersão. O ensaio foi executado baseado nas recomendações da ABNT NBR 9778:2005. Os concretos foram avaliados nas idades de 28 e 63 dias, sendo previsto três corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm para cada idade. Foram utilizadas fôrmas de PVC isentas de desmoldante para evitar interferência devido à impregnação superficial dos poros do concreto.

Na depuração dos resultados de resistência mecânica das dosagens de concreto avaliadas, aplicou-se o critério de “Chauvenet” (TAKEYA, 2001), rejeitando-se aquele resultado que apresentou desvio acima do estabelecido.

#### **4.7. Avaliação das propriedades microestruturais**

A fim de avaliar as propriedades microestruturais dos concretos estudados, utilizou-se, neste estudo, a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Com auxílio desta técnica foi possível estudar concretos elaborados com e sem agregados dopados, tendo por objetivo analisar a zona de transição pasta/agregado.

A técnica de MEV baseia-se em imagens da estrutura do material (no caso, a zona de transição) a ser analisado que, associada à espectroscopia por dispersão de energia (EDS), é capaz de fazer uma microanálise dos compostos e elementos químicos observados.

As fotomicrografias de amostras fraturadas foram avaliadas com detector secundário e, conforme dito anteriormente, forneceram a morfologia da amostra e suas características, principalmente em relação às interfaces e as diferenças entre as diversas fases a serem investigadas. Já as de amostras polidas, que foram analisadas com detector de elétrons retroespalhados, possibilitaram observar as várias fases das pastas de cimento pelo nível de tonalidade cinza da imagem.

As imagens obtidas através de elétrons retroespalhados dependem da variação da massa atômica de cada fase, cujas fases com maior número atômico (Z) apresentam-se mais brilhantes. Para pasta hidratada, as fases variam de um branco brilhante ao preto na seguinte seqüência: cimento anidro, hidróxido de cálcio, silicato de cálcio hidratado e outros hidratos e porosidade. Para determinar a composição química em um ponto da amostra, faz-se uma análise qualitativa de áreas pontuais, utilizando-se equipamentos acessórios como o EDS (espectrômetro de dispersão de energia). Neste caso, os sinais de interesse correspondentes são os raios-X característicos.

As análises por EDS feitas em alguns pontos da amostra auxiliaram na identificação dos produtos hidratados, bem como permitiram estabelecer as relações Ca/Si, Al/Ca e Ca/(Si+Al) que são muito exploradas na literatura.

Para a realização do estudo semi-quantitativo, utilizou-se dados consagrados na literatura, julgando serem de maior interesse as seguintes fases: fase anidra, fase de CH, fase de C-S-H. Nas amostras que contêm escória, aparecem fases com tons cinza intermediários entre claro e médio, portanto entre grão anidro e CH. A discriminação das fases presentes na pasta de cimento hidratada pelos tons cinza é mostrada na Tabela 8. Uma vez identificadas as partículas, auxiliado pelo EDS, tornou-se possível estimar as diferentes fases presentes nas amostras com base na porcentagem das diferentes tonalidades de cinza, utilizando-se recursos de processamento de imagem para discretizar cada tom.

**Tabela 8: Discriminação das fases presentes na pasta de cimento hidratada pelos tons cinza.**

Tons cinza	Fases
Branco (claro)	grão anidro (A)
Médio	portlandita (CH)
Escuro	outros produtos hidratados* (OPH)
Preto	poros (P)

(\*) incluindo o C-S-H

Fonte: Patel, Bland e Poole, 1996; Melo, 2000; Silva, 2000; Scrivener, 2004.

As análises no microscópio eletrônico de varredura foram realizadas no Instituto de Química de São Carlos (IQSC). O microscópio eletrônico de varredura consiste basicamente de uma coluna óptico-eletrônica, de uma câmara para a amostra, sistema de vácuo, controle eletrônico e sistema de obtenção de imagem. Quando um ponto da superfície da amostra é alcançado por um feixe de elétrons, diferentes sinais podem ser detectados independentemente.

A comparação dos resultados de microscopia na interface pasta/agregado dos concretos com e sem dopagem, confeccionados com laterita e seixo rolado, foi realizada a partir da análise de fotomicrografias, obtidas em microscópio eletrônico de varredura (Figura 51), da marca LEO (modelo 440) com detector OXFORD, operando com feixe de elétrons de 20 kV.



**Figura 51: Microscópio eletrônico de varredura utilizado no estudo.**

Além da zona de transição pasta/agregado, é de fundamental importância e imprescindível o estudo da camada de dopagem, ou seja, a avaliação da carapaça que envolve o agregado graúdo. As soluções de dopagem (calda de alto desempenho e solução de água e sílica ativa) aderidas aos agregados graúdos foram previamente analisadas com auxílio de microscópio digital da marca Olympus e modelo MIC-D (Figura 52), que permite aumento de 24 a 255 vezes.



**Figura 52: Microscópio digital utilizado no estudo.**

O estudo prévio das soluções de dopagem possibilitou a visualização de alguns parâmetros, tais como a capacidade de impregnação da sílica ativa aos agregados estudados, a existência ou não de aderência física, por ligação mecânica, entre o agregado e a pasta, a investigação da espessura da camada de dopagem, etc.; parâmetros estes confirmados após exame detalhado em microscópio eletrônico de varredura.

Neste estudo foram utilizadas amostras fraturadas e polidas de concreto, com 28 dias de idade, retiradas da parte mais central dos corpos de prova, de forma que a amostra tivesse a menor interferência possível relacionada à produção do concreto, como, por exemplo, óleo ou sujidades oriundas da fôrma e/ou relação a/agl diferenciada devido ao possível efeito parede no contato concreto/fôrma.

---

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

### 5.1. Caracterização do material

Os resultados de caracterização dos cimentos, agregados miúdo e graúdo, adição mineral e aditivo superplastificante utilizados encontram-se no apêndice A. Apresentam-se, nesta seção, algumas considerações pertinentes para o estudo, referentes aos cimentos e agregados graúdos empregados.

#### 5.1.1. Cimentos

A partir da análise química dos cimentos (apêndice A) é possível dizer que não há potencial de formação da reação álcali-agregado (RAA) nos concretos. Apesar dos teores de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv.}}$  estarem acima de 0,6%<sup>36</sup> (0,71 e 0,63 respectivamente nos cimentos CPV ARI e CPIII 40 RS), é improvável o risco de ocorrer reações RAA, dado o fato dos agregados não apresentarem histórico de reatividade. Não há registro de reações álcalis/agregado nos concretos elaborados com seixo rolado proveniente da região de São Carlos/SP, diferentemente dos concretos feitos com seixo proveniente do noroeste do estado de São Paulo.

O cimento CPIII 40 RS foi utilizado na confecção dos concretos e o CPV ARI foi empregado na elaboração da calda de impregnação dos agregados. Optou-se por usar um cimento contendo escória granulada de alto-forno na composição dos concretos, pelo fato da escória diminuir o calor de hidratação das misturas, aumentar a resistência à compressão em idades avançadas e melhorar a trabalhabilidade, além de modificar a microestrutura, diminuindo a permeabilidade e aumentando a durabilidade do material; fatores importantes para a obtenção de concretos de alto desempenho. O interesse pelo uso do cimento CPV ARI está em sua alta área específica e conseqüente menor tempo de início de pega, que favorecem o processo de impregnação dos agregados.

---

<sup>36</sup> Os cimentos Portland com teor acima de 0,6% de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv.}}$ , quando combinados com agregados reativo a álcalis, desenvolvem o fenômeno RAA. Concretos com alto teor de cimento possibilitam a RAA mesmo que o valor limite de 0,6% de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equiv.}}$  não tenha sido atingido. Quando o conteúdo total de álcalis, de todas as fontes for inferior a  $3\text{kg/m}^3$ , a reação não deverá ocorrer.

### 5.1.2. Agregados

Pelo fato das características físicas e mineralógicas dos agregados gráudos influenciarem no comportamento dos concretos, conforme detalhado na seção 3.2.1. (Características dos agregados), buscou-se estudar dois materiais distintos, de tal modo que fosse possível avaliar a técnica de dopagem em situações extremas. Sem contar o aspecto mineralógico, a laterita e o seixo rolado são materiais com características físicas completamente diferentes, principalmente no que diz respeito à forma e textura superficial, resistência mecânica e absorção, e também à coloração, conforme pode ser observado na Figura 53.



**Figura 53: Forma, textura superficial e coloração da laterita (à esq.) e do seixo rolado (à dir.).**

A análise visual dos materiais evidencia o formato arredondado e a textura superficial lisa do seixo rolado, e a textura alveolar e o formato mais anguloso da laterita. Esta diferença na angulosidade reflete nos resultados de índice de vazios dos respectivos agregados: enquanto o índice de vazios do seixo rolado é de 37,6%, o da laterita é igual a 41,6%. Conforme literatura, para a monodispersão quanto mais arredondado for o agregado mais próximo de 33% estará seu índice de vazios (LIBORIO, 2003).

Em se tratando de resistência mecânica e absorção, a disparidade entre o seixo rolado e a laterita é notória. A começar pela resistência, o seixo rolado utilizado neste estudo apresenta resistência à compressão em torno de 120 MPa enquanto a resistência da laterita está entre 60 MPa e 70 MPa. Esta diferença é resultante da própria composição mineralógica dos agregados, envolvendo o processo natural de formação dos mesmos. Com relação à absorção de água, a laterita absorve cerca de dez vezes mais (3,92%) que o seixo rolado (0,38%). A capacidade de absorção e a facilidade com que a água entra e sai do agregado são determinadas pela forma, tamanho e distribuição dos poros deste material

(MAGALHÃES, 2007). Então, o sucesso da dopagem da laterita apóia-se justamente na boa possibilidade de penetração da solução de dopagem permitida pelo agregado laterítico.

Conforme será visto na seqüência (seção 5.3.2.), o ensaio de porosidade por intrusão de mercúrio realizado no agregado laterítico antes e após a dopagem indica drástica redução de vazios após a aplicação da técnica.

Com relação à coloração, o vermelho da laterita pode ser explorado de forma a tornar interessantes os concretos elaborados com este agregado. Tais concretos se tornam atrativos quando utilizados, por exemplo, em peças estruturais aparentes, realçando aspectos arquitetônicos das construções. Os concretos com diferentes colorações serão apresentados mais adiante, incluindo breve comentário acerca do potencial destas misturas e suas perspectivas de aplicação.

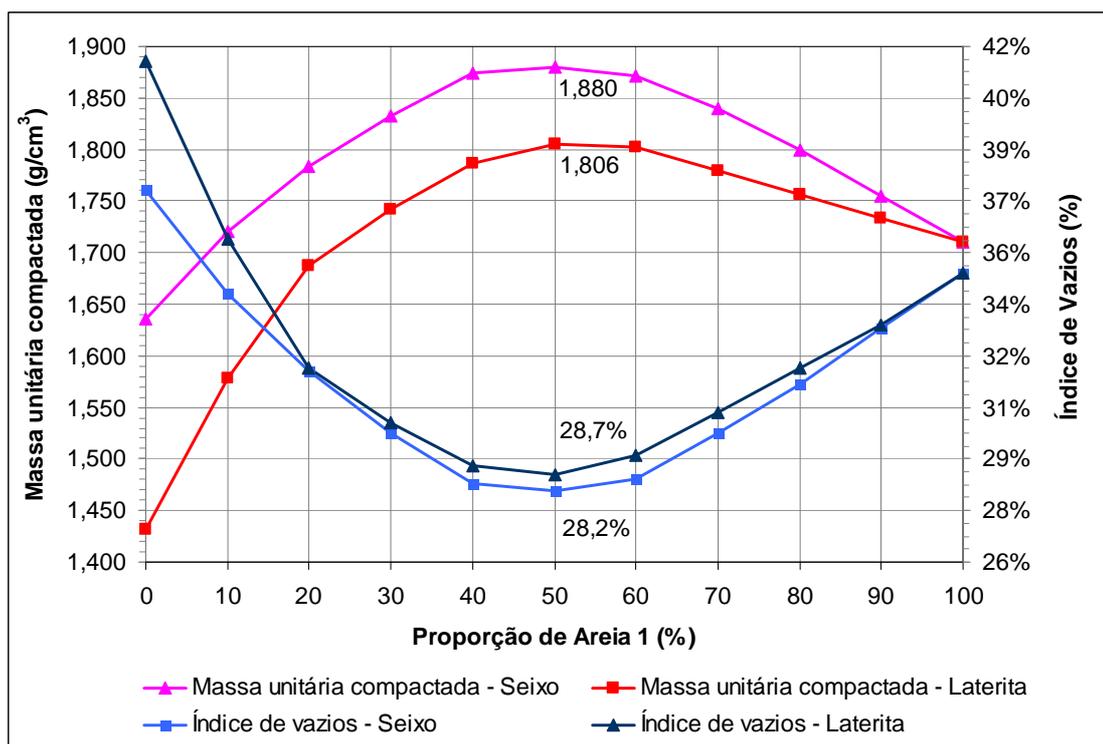
## **5.2. Ensaio preliminares**

A seguir são apresentados os resultados referentes ao empacotamento dos agregados e à avaliação dos aditivos superplastificantes.

### **5.2.1. Empacotamento dos agregados**

As areias utilizadas neste estudo, denominadas de Areia 1 e Areia 2, são do tipo quartzosas de cava retiradas de jazidas próximas da região de São Carlos. As Areia 1 e Areia 2 apresentam, respectivamente, diâmetros máximos característicos iguais a 2,40 mm e 0,30 mm, módulos de finura de 2,30 e 0,33 e massas específicas secas iguais a 2,618 g/cm<sup>3</sup> e 2,642 g/cm<sup>3</sup>. Além das areias, utilizou-se o fíler SM 500, a base de quartzo moído, que é produzido pela Mineração Jundu Ltda., a fim de melhorar o empacotamento das partículas. O fíler SM500 possui massa específica igual a 2,640 g/cm<sup>3</sup> e grãos passantes na peneira de malha 500 (abertura de 25 µm).

A primeira fase do empacotamento teve por objetivo estimar o teor ideal de argamassa dos concretos e envolveu combinações de Areia 1 com seixo rolado e Areia 1 com laterita, conforme resultados mostrados na Figura 54.

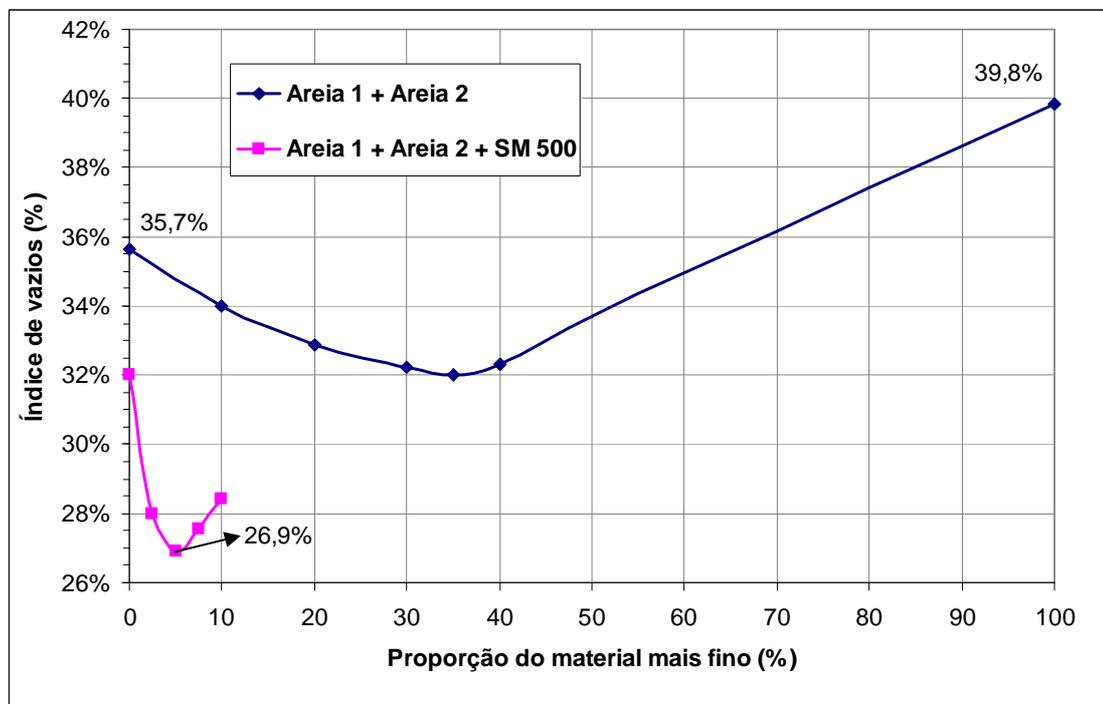


**Figura 54: Massa unitária compactada e índice de vazios em ensaios de empacotamento de Areia 1 e agregados graúdos.**

A partir da Figura 54 pode-se observar que a combinação considerada ideal (máxima massa unitária compactada com o respectivo mínimo índice de vazios) foi de 50% de Areia 1 e 50% de agregado graúdo, sendo ele a laterita ou o seixo rolado. A partir desta combinação o teor de argamassa dos traços médios (1:5,5) resulta em 58%. Considerando que os valores ótimos desta combinação estão próximos dos obtidos com a proporção de 60% de agregado graúdo e 40% de Areia 1, optou-se por utilizar 60% de agregado graúdo por resultar em teor de argamassa bem menor (49%). No caso da laterita a composição dos materiais resultou em massa unitária igual a  $1,787 \text{ g/cm}^3$  e índice de vazios de 28,7%. E no caso do seixo rolado, a composição resultou em massa unitária igual a  $1,874 \text{ g/cm}^3$  e índice de vazios de 28,2%.

A segunda fase do empacotamento teve por objetivo auxiliar na dosagem de alguns traços complementares de concreto confeccionados com agregado laterítico. Neste empacotamento, foram combinados dois agregados miúdos (Areias 1 e 2) e fíler SM 500, na seqüência da maior para a menor granulometria. O primeiro empacotamento entre a Areia 1 e a Areia 2 resultou em proporção 65% de Areia 1 e 35% de Areia 2. O ensaio entre esta mistura nesta proporção e o fíler SM 500 indicou o ponto ótimo na proporção de 5% de SM

500 e 95% da mistura anterior. Os resultados destes ensaios, expresso em termos de índice de vazios, são mostrados na Figura 55.



**Figura 55: Índice de vazios em ensaios de empacotamento dos agregados miúdos.**

A mistura ideal entre os três materiais ficou então definida em 61,75% de Areia 1, 33,25% de Areia 2 e 5,00% de fíler SM 500, resultando em índice de vazios de 26,9% e massa unitária compactada de 1,919 g/cm<sup>3</sup>.

O efeito do empacotamento de partículas fica evidente no gráfico da Figura 55. Caso as areias fossem utilizadas individualmente, o que é muito comum em concretos convencionais, o índice de vazios estaria entre 35,7% e 39,8%, sendo que ao combiná-las este valor é reduzido para 32%. O desempenho mais marcante ocorre com a aplicação de fíler, reduzindo o índice de vazios para menos de 27%. Se considerar o uso de apenas da Areia 2 isto representa redução de quase 13% de vazios que deixarão de ser preenchidos com pasta de cimento.

A fase final de empacotamento se deu com a mistura do agregado graúdo laterítico e agregados miúdos.

Para a elaboração dos traços complementares de concreto laterítico considerou-se a proporção encontrada na primeira fase do empacotamento que foi de 60% de laterita e 40% de agregado miúdo, sendo esta última parcela composta por 24,7% de Areia 1, 13,3%

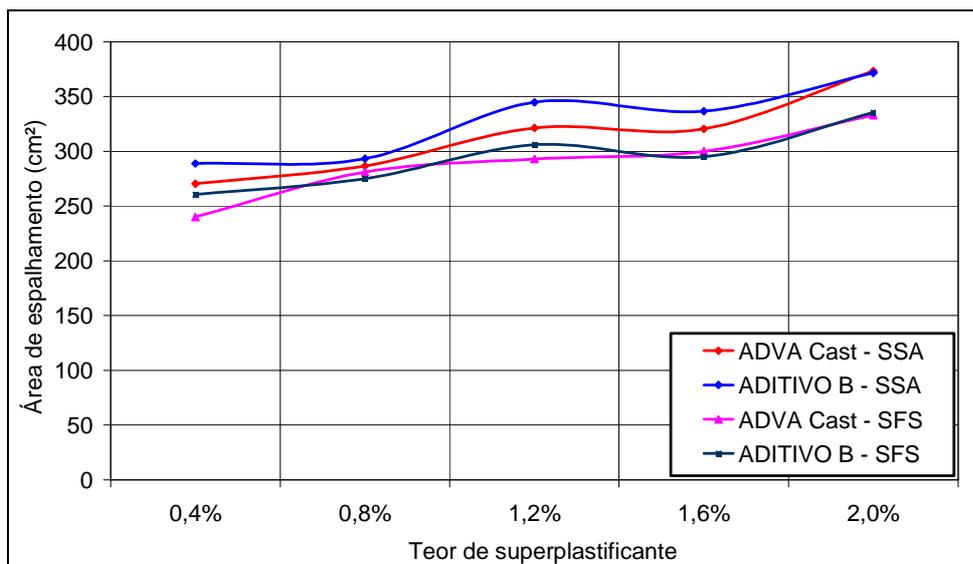
de Areia 2 e 2,0% de fíler SM 500. Se comparado ao índice de vazios de 28,7% encontrado no empacotamento de laterita e Areia 1 apenas, a redução chegou a 7,4%. Com este empacotamento, a mistura final dos traços complementares fica com apenas 21,3% do volume total a serem preenchidos com pasta de cimento.

Já nos concretos lateríticos de traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5 optou-se por não incluir o fíler no empacotamento destas misturas. O fíler SM500 utilizado neste estudo, apesar de proporcionar queda no índice de vazios das misturas, apresenta custo relativamente elevado, por ser um material originalmente destinado a segmentos industriais outros que não a construção. Mesmo sem a adição do fíler, a mistura com 60% de laterita, 65% de Areia 1 e 35% de Areia 2 apresentou resultado satisfatório para o índice de vazios, que foi de 24,8%.

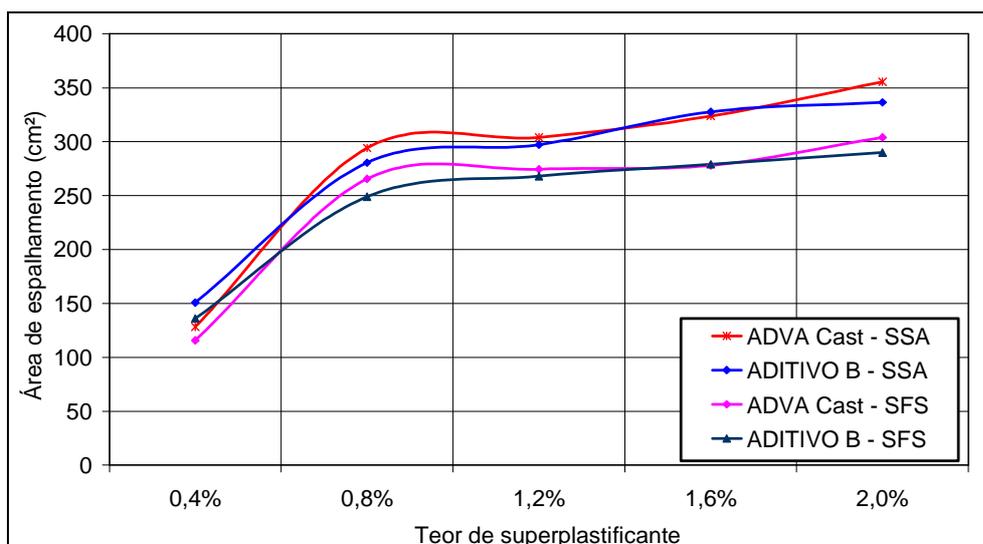
### 5.2.2. Avaliação dos aditivos

Por meio do ensaio de miniabatimento de tronco de cone foram avaliados dois aditivos superplastificantes de 3ª geração, à base de policarboxilatos. A escolha do aditivo utilizado nos traços de concreto baseou-se no máximo espalhamento, na menor perda de espalhamento com o tempo e na menor interferência na pega.

O espalhamento das caldas foi medido aos 20 minutos contados a partir da mistura do cimento com a água. Os teores de aditivo variaram de 0,4% a 2,0% da massa de aglomerante, sendo a compatibilidade de ambos verificada para os cimentos CP III 40 RS e CPV ARI, em misturas sem sílica ativa (SSA) e com sílica (SFS). Deve ser lembrado que os resultados referentes as misturas sem sílica ativa apenas auxiliam na didática do estudo, uma vez que se escolheu dopar os agregados com calda contendo sílica ativa, conforme detalhado na seção 4.3.1. (Formas de dopagem). Os resultados das curvas “área de espalhamento *versus* teor de superplastificante” estão apresentados na Figura 56 e na Figura 57.



**Figura 56:** Curva “área de espalhamento versus teor de aditivo” para caldas confeccionadas com CPIII 40 RS.



**Figura 57:** Curva “área de espalhamento versus teor de aditivo” para caldas confeccionadas com CPV ARI.

Comparando-se os gráficos da Figura 56 e Figura 57, observa-se que para baixos teores de aditivo (0,4% e 0,8%) a área de espalhamento com o cimento CPIII 40 RS é ligeiramente maior se comparada à área com o CPV ARI. Isto é justificado devido à substituição de 46% do clínquer pela escória de alto forno, resultando em pastas com maior quantidade de água disponível para hidratar o cimento devido às reações com a escória ocorrerem posteriormente.

Para ambos os cimentos avaliados, as caldas contendo sílica ativa (SFS) mostraram-se menos trabalháveis que as caldas sem sílica (SSA) (menores áreas de espalhamentos). Essa diferença está relacionada com a incorporação de aditivo, que aumenta a quantidade de finos da mistura e, com isso, aumenta a demanda de água para total envolvimento das partículas.

Pelas curvas pode-se dizer que o teor ótimo de aditivo das caldas com cimento CPIII 40 RS e sílica ativa encontra-se entre 1,6 e 2,0% da massa de aglomerante (Figura 56) e no caso das caldas com CPV ARI e sílica ativa (Figura 57) pode-se afirmar que seu comportamento é muito semelhante entre os teores de 0,8% e 1,2%, sendo que o maior ganho de espalhamento se manifesta para teores elevados de aditivo. Lembrando que altos teores de superplastificante podem inviabilizar seu uso pelo possível retardamento excessivo na pega do cimento.

A partir do ensaio de miniabatimento de tronco de cone não foi possível escolher entre os aditivos avaliados, já que o comportamento de ambos foi semelhante, independente do teor utilizado. O mesmo ocorreu quanto à avaliação dos cimentos: eles praticamente tiveram o mesmo desempenho, exceto no teor de 0,4%, possibilitando, a princípio, o emprego de ambos na dopagem dos agregados. Diante de tais situações, o ensaio de tempo de pega foi imprescindível para escolher o melhor sistema cimento+aditivo, além do teor ótimo de superplastificante a ser empregado nos concretos.

A escolha pelo cimento foi feita com base nos resultados de tempo de pega das misturas produzidas sem incorporação de aditivo, sendo possível escolher o cimento CPV ARI para a dopagem dos agregados, já que o início de pega destas misturas ocorreu cerca de 1 hora e 40 minutos antes do início daquelas feitas com CPIII 40 RS, também sem aditivo. Tal diferença é atribuída à maior finura do cimento CPV ARI e também ao maior teor de clínquer – o que resulta em maior teor de  $C_3S$  e  $C_3A$ , que são os compostos que hidratam mais rápido, levando à pega.

O início de pega da calda com CPV ARI ocorreu aos 159 minutos e o fim de pega aos 275 minutos, enquanto que o início de pega da calda com CPIII 40 RS ocorreu somente aos 260 minutos e o fim de pega aos 365 minutos.

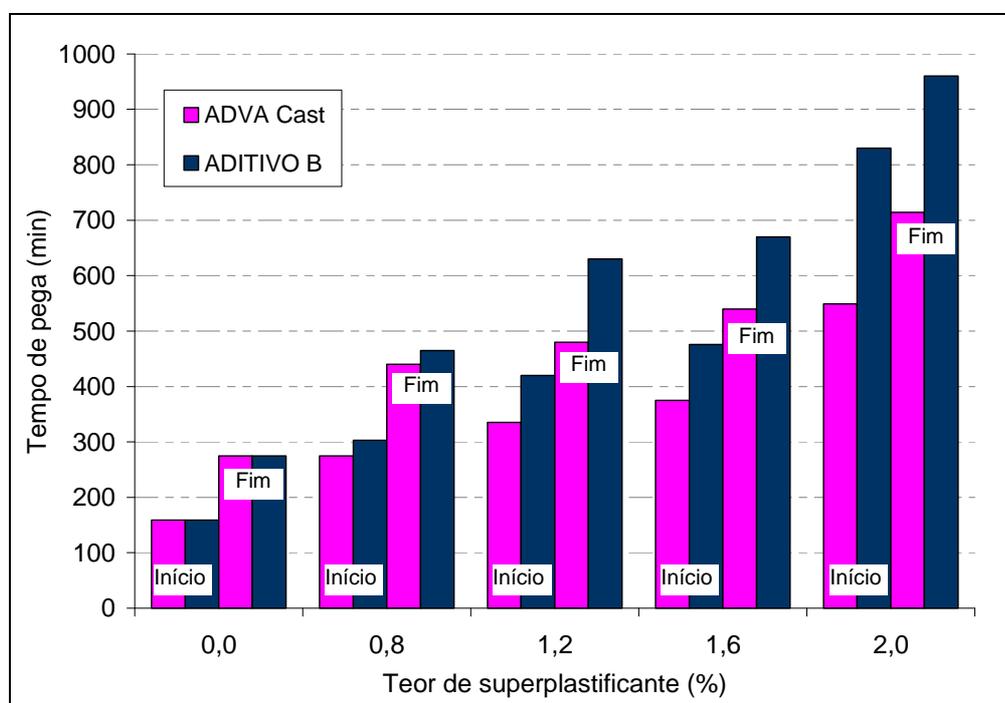
A explicação para a escolha por um cimento com menor tempo de pega está relacionada com o processo de dopagem dos agregados, visto na seção 4.3.3 (Procedimentos de mistura), mais precisamente com a preocupação quanto à permanência da calda de dopagem no agregado após este ser misturado com os demais constituintes do concreto. Considera-se que quanto mais próximo do início de pega da calda for realizada esta mistura, menor a chance da impregnação ser removida com o atrito dos grãos. Desta

forma, o emprego do cimento CPV ARI com maior finura torna-se vantajoso para o processo produtivo dos concretos elaborados com a técnica de dopagem à medida que possibilita menores tempos de execução.

A escolha pelo aditivo superplastificante ADVA Cast também foi feita com base no menor tempo de início de pega proporcionado às caldas de alto desempenho. Os resultados dos tempos de pega dos dois aditivos estudados e a comparação de tais resultados estão apresentados na Tabela 9 e na Figura 58.

**Tabela 9: Resultados dos tempos de pega das caldas de alto desempenho confeccionadas com CPV ARI.**

Tempo de pega (minutos)	Teor de aditivo (%)					Aditivo
	0	0,8	1,2	1,6	2,0	
Início	159	275	335	375	549	ADVA Cast
Fim	275	440	480	540	714	
Início	159	303	420	476	830	ADITIVO B
Fim	275	465	630	670	960	



**Figura 58: Comparação do efeito do aditivo superplastificante nos tempos de pega das caldas de alto desempenho confeccionadas com CPV ARI.**

A partir dos ensaios de miniabatimento de tronco de cone e tempo de pega, concluiu-se que o aditivo ADVA Cast, em um teor de 0,8% relativo à massa de aglomerante, foi o mais adequado tanto para dispersar as partículas, sem ocasionar exsudação da mistura, quanto para não provocar retardamento excessivo da pega do cimento. Além disso, este teor não compromete a viabilidade quanto ao tempo de produção do concreto dopado, já que a mistura do concreto (agregado previamente dopado e demais materiais constituintes) ocorrerá aos 275 minutos (4 horas e 35 minutos). Portanto, as caldas de alto desempenho foram confeccionadas com 0,8% de aditivo ADVA Cast.

Nos traços complementares de concreto contendo laterita e confeccionados com cimento CPIII 40 RS, optou-se por empregar 2,0% de aditivo ADVA Cast. A explicação para o uso de alto teor de superplastificante está na necessidade de reduzir ao máximo o consumo de água, visando atingir o alto desempenho destes concretos. Para estes traços não houve preocupação quanto ao possível retardamento no tempo de pega, já que o objetivo foi explorar o potencial desempenho das misturas.

Já no caso dos concretos lateríticos de traços 1:3,5, 1;5,0 e 1:6,5, optou-se por usar um teor de aditivo um pouco menor, no caso 1,6% de ADVA Cast, baseado na preocupação quanto ao tempo de pega. Vários estudos desenvolvidos pelo grupo LMABC demonstraram que concretos produzidos com elevados teores de aditivo apresentaram retardo na pega, porém, dependendo do consumo de cimento, tipo de aditivo, relação a/c e temperatura, não chegam a inviabilizar as resistências iniciais das misturas. Segundo Rebmann (2011), ajustes de quantidade de aditivo no concreto podem ser necessários, pois há interação com os demais participantes do traço, principalmente os materiais mais finos, além de uma relação a/agl diferente.

Vale lembrar que nenhum dos concretos com seixo rolado foi executado com aditivo superplastificante.

### **5.3. Dopagem dos agregados**

Antes de apresentar os resultados da técnica de dopagem desenvolvida neste estudo deve ser lembrado que para cada região estarão disponíveis materiais específicos, com características próprias, cabendo ao engenheiro adequá-los para uso no desenvolvimento da técnica de dopagem. Dentre muitos exemplos, cita-se o tipo de aditivo superplastificante disponível e a quantidade que se deseja utilizar, já que estas variáveis irão influenciar diretamente nas características e procedimentos de dopagem, tais como a

consistência da pasta de impregnação e seu tempo de pega; ambos relacionados com o tempo de mistura do agregado dopado aos demais constituintes do concreto.

Na seqüência são apresentados os traços de dosagem da impregnação, referentes à calda de alto desempenho e à solução de água com sílica ativa, e os procedimentos de mistura, incluindo tanto os usados para elaborar a calda de alto desempenho e a solução de água e sílica ativa quanto os usados para homogeneizar as soluções de impregnação com os agregados graúdos. Estes resultados seguem as nuances dos agregados empregados.

### 5.3.1. Composições dos traços

A escolha do sistema cimentício composto por cimento CPV ARI e sílica ativa de Fe-Si adotado neste estudo para a calda de alto desempenho apoiou-se na grande gama de informações que o grupo LMABC possui em seu banco de dados a respeito de pastas, argamassas e concretos confeccionados com estes materiais. O uso do cimento CPV ARI foi justificado na seção 5.2.2. (Avaliação dos aditivos) e da sílica ativa baseia-se nos benefícios que esta adição confere ao concreto, conforme detalhado na seção 3.1.2. (Adições minerais).

Em relação ao consumo de cimento estabeleceu-se a proporção de 10 % de adição mineral, referindo-se esta quantidade à proporção volumétrica em relação ao total de aglomerantes. Baseado nos resultados de Melo (2000), e em várias experiências que se seguiram pelo grupo LMABC, a proporção de 10 % de sílica ativa é capaz de contribuir, com boa relação custo/benefício, principalmente em idades mais altas, com a melhoria da zona de transição pasta/agregado, refletindo em incremento da resistência mecânica. Optou-se por utilizar relação a/agl igual a 0,35, pois o uso de maior quantidade de água poderia levar à exsudação da pasta. A quantidade de água adotada justifica-se também pelo gráfico de desconexão de poros x teor de sílica ativa x relação a/c (apresentado na Figura 21, p. 49).

O aditivo ADVA Cast foi empregado em um teor de 0,8% relativo à massa de aglomerante, sendo capaz de dispersar as partículas de cimento e não provocar retardamento excessivo da pega. Com base nestes parâmetros foi dosado o traço da calda de alto desempenho usada na impregnação dos agregados graúdos (laterita e seixo rolado), com os consumos dos materiais indicados na Tabela 10.

**Tabela 10: Consumos de materiais da calda de alto desempenho.**

	Cimento	Sílica ativa	Aditivo	Água
Traço unitário	0,900	0,067	0,008	0,350
1 metro cúbico	1315 kg	103 kg	12 kg	511 kg

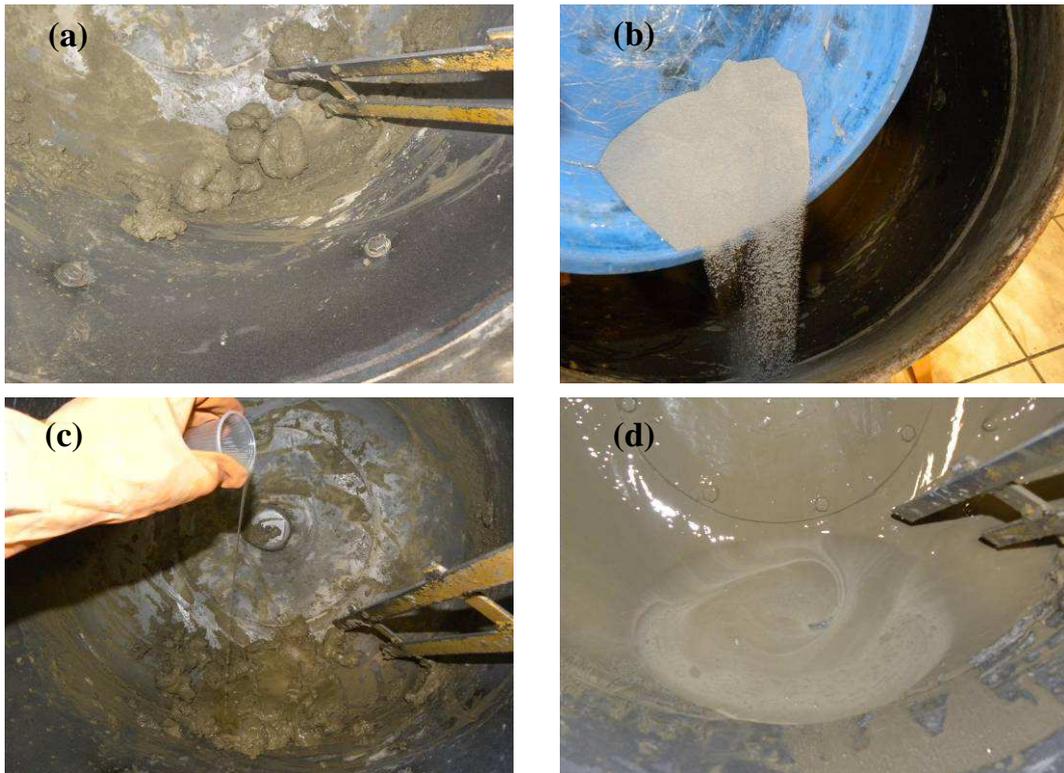
A composição da solução de água com sílica ativa foi avaliada misturando-se diferentes teores de sílica ativa em determinado volume de água. Os teores de sílica ativa analisados variaram de 5% a 50% da quantidade de água. Para teores acima de 10% observou-se que a quantidade de sílica ativa passa a ser inviável, tanto pela dificuldade de penetração das partículas para o interior da laterita, já que estas se encontravam em alto estado de floculação, quanto pelo elevado custo do material. Desta forma, optou-se por usar a proporção de 1 kg de sílica ativa para cada 10 kg de água (10% de sílica).

### 5.3.2. Procedimentos de mistura

Com base no estudo da ordem de colocação dos materiais desenvolvido por Castro (2007) e considerando o lançamento atrasado do superplastificante (somente após os 10 primeiros minutos do contato do cimento com a água) optou-se por produzir as caldas de alto desempenho seguindo as seguintes etapas:

- Adição do cimento CPV ARI e 90% da água de amassamento. Homogeneização por 3 minutos.
- Repouso de 1 minuto e adição da sílica ativa. Homogeneização por 3 minutos.
- Repouso de 3 minutos para completar os 10 minutos de mistura contados a partir do contato do cimento com a água. Adição do aditivo superplastificante e do restante da água de amassamento. Homogeneização final por 4 minutos, totalizando 14 minutos de mistura.

As caldas de alto desempenho foram confeccionadas em misturador mecânico. As etapas de confecção são mostradas na Figura 59.



**Figura 59: Etapas da confecção da calda de alto desempenho: (a) cimento e água homogeneizados; (b) lançamento da sílica ativa; (c) lançamento do aditivo; (d) mistura final.**

Observa-se que com o lançamento atrasado do aditivo superplastificante é possível obter máximo aproveitamento do produto, refletindo em excelente fluidez da mistura e otimização do sistema, conforme visualizado na Figura 60.



**Figura 60: Fluidez da calda de alto desempenho após lançamento atrasado do aditivo superplastificante.**

Para as soluções de água e sílica ativa o procedimento de mistura compreendeu o lançamento da sílica ativa na água e a mistura com disco giratório, promovendo a tentativa

de defloculação da sílica. As etapas de obtenção destas soluções são apresentadas na Figura 61.



**Figura 61: Etapas da confecção da solução de água e sílica ativa.**

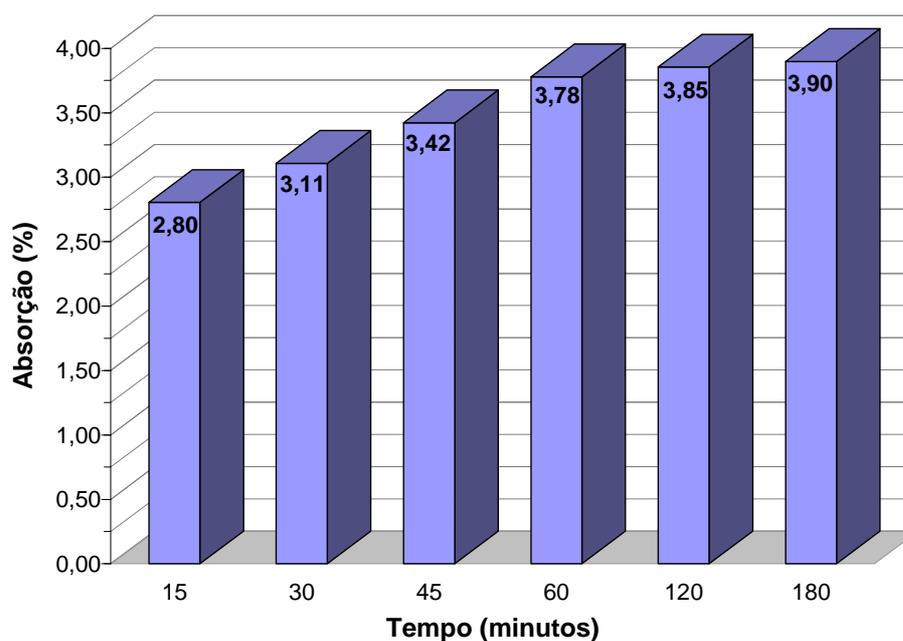
Após análise dos resultados microscópicos, que serão vistos na seção 5.7.1. (Resultados microestruturais da laterita), foi possível concluir que o procedimento de mistura da sílica ativa na água usando disco giratório, na tentativa de defloculação da adição, foi ineficiente, já que os grãos de sílica permaneceram com dimensões elevadas (diâmetro médio em torno de 100  $\mu\text{m}$ ).

Romano e colaboradores (2008) avaliaram as características de dispersão em água de duas sílicas ativas comerciais, submetendo-as a condições de cisalhamento brando (misturador convencional de baixa energia) e intenso (dispersor de alta energia). Por meio de resultados de caracterizações de granulometria, microscopia eletrônica de varredura e eficiência de dispersão os autores atestaram que o dispersor de elevada energia de cisalhamento foi mais eficiente que o misturador rotacional na dispersão da SA. Ainda assim, o dispersor intenso permitiu a obtenção de partículas com diâmetro médio (D50) de 20  $\mu\text{m}$ , maior que o diâmetro das partículas primárias de SA, as quais estão na faixa de 0,1  $\mu\text{m}$ , podendo-se inferir que a total dispersão da SA demanda equipamentos ainda mais eficientes.

Com base nesse estudo, e considerando-se que no presente estudo foi utilizado um misturador convencional de baixa energia (com disco giratório acoplado), justifica-se a presença de grãos de sílica ativa em estado aglomerado.

Após confeccionadas as misturas de impregnação e antes de iniciar o procedimento de dopagem dos agregados, levou-se em conta que agregados porosos podem absorver água da interface pasta/agregado, causando problemas na continuidade da matriz e resultando em baixa resistência do material concreto constituído.

Diante do exposto, normalmente se admite que no momento da pega do concreto o agregado esteja em condição saturada superfície seca. Assim, realizou-se o estudo do comportamento de absorção de água da laterita em relação ao tempo. Este estudo auxiliou na determinação do tempo de imersão do agregado laterítico na água (para a dopagem com calda de alto desempenho) e na solução de água e sílica ativa (para a dopagem com solução). A Figura 62 mostra a evolução da absorção ao longo do tempo.



**Figura 62: Determinação da absorção de água da laterita em função do tempo.**

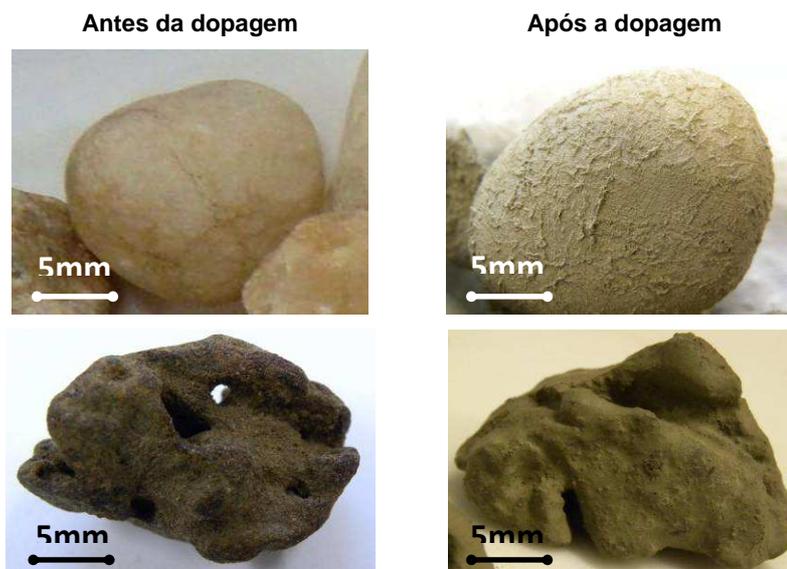
Observando os resultados da Figura 62 nota-se que o valor de absorção da laterita tende a estabilizar somente aos 180 minutos de imersão, sendo que apresenta um pico aos 15 minutos e em seguida cresce linearmente até os 60 minutos, atingindo o valor de 3,78% neste instante. Considerando que aos 60 minutos a maior parte da absorção já tenha sido promovida (96,4%) e que este tempo de imersão é três vezes menor se comparado ao tempo referente à completa absorção (180 minutos), optou-se por saturar o agregado laterítico durante 60 minutos, conseguindo assim agilidade no processo produtivo.

A diferença na massa específica (massa do material por unidade de volume, incluindo os poros existentes dentro da partícula) da laterita, na condição seca ( $2,449 \text{ g/cm}^3$ ), foi de 4% em relação à massa específica na condição saturada superfície seca ( $2,545 \text{ g/cm}^3$ ).

Conforme detalhado na seção 4.3.3. (Procedimentos de mistura) o procedimento de dopagem da laterita e do seixo rolado ocorreu com a inserção do agregado nas soluções de impregnação previamente preparadas, sendo em seguida realizado o peneiramento do agregado dopado de modo que o excesso da calda fosse eliminado. Ao passar pela peneira, foi possível mensurar este excesso e estimar o real consumo de calda usado para dopar os agregados de 1 metro cúbico de concreto. No caso do seixo rolado o consumo resultou em aproximadamente 50 kg de aglomerante por  $m^3$  de concreto e para a laterita o consumo foi de 180 kg de aglomerante por  $m^3$  de concreto. As próprias características físicas da laterita (textura rugosa e estrutura alveolar) justificam o maior consumo. Considerando um metro cúbico de concreto, isto representa um aumento de 10% no custo final do produto dopado para o caso do seixo rolado e de 25% para o caso da laterita. Em vista dos benefícios que a técnica de dopagem proporciona aos concretos, como melhoria de propriedades físicas, mecânicas e microestruturais, além de economia nos custos de transporte e aquisição do agregado, estes aumentos acabam se justificando e se diluindo frente às melhorias do processo de dopagem.

Existe a possibilidade de prever teoricamente o consumo de calda de alto desempenho por metro cúbico de agregado ao considerar o somatório da área superficial de todas as partículas do material. Para isso é necessário conhecer a distribuição granulométrica do mesmo e adotar uma espessura média para a camada de impregnação. Deve estar claro que esta previsão baseia-se em um cálculo aproximado, uma vez que as partículas são admitidas como esferas perfeitas e a espessura da camada é dependente da consistência da calda de impregnação, sendo difícil mensurá-la de forma precisa. No momento, esta previsão se distancia do objetivo do estudo.

Na Figura 63 podem ser vistos o seixo rolado e a laterita em estado original e a modificação de suas texturas após aplicação da técnica de dopagem mediante impregnação com calda de alto desempenho. Observa-se o aumento na rugosidade do seixo rolado após o tratamento, algo extremamente importante para a melhoria na aderência entre este agregado e a matriz de cimento. Na laterita as alterações mais significativas estão em sua conformação superficial, que tende para uma forma mais esférica, e na diminuição dos poros superficiais. O formato esférico e menor quantidade de vazios superficiais podem representar aumento na fluidez do concreto laterítico dopado.



**Figura 63: Textura superficial do seixo rolado (linha superior) e da laterita (linha inferior) antes e após impregnação com calda.**

A diminuição dos poros superficiais foi confirmada mediante ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Os resultados de intrusão de mercúrio foram obtidos na forma de volume acumulativo de mercúrio penetrado por unidade de massa em função do diâmetro de intrusão do poro. Na Tabela 11 são mostrados os pesos das amostras analisadas e os resultados de porosimetria obtidos.

**Tabela 11: Resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio de amostras lateríticas com e sem camada de dopagem.**

	Massa (g)	Absorção absoluta (%)	Porosidade absoluta (%)	Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )
Amostra sem dopagem	4,68	3,08	7,45	2,42
Amostra com dopagem	8,27	2,00	4,74	2,37

Antes de discutir os resultados apresentados, deve-se ressaltar que os valores encontrados são apenas indicativos do comportamento das amostras ensaiadas, já que o ensaio foi realizado com apenas um grão de agregado para cada situação (sem e com dopagem). A diferença entre o valor de absorção de água da laterita obtida no ensaio de caracterização (3,92%) e no ensaio PIM (3,08%) se deve justamente ao número restrito de amostra. Apesar de este ensaio ter sido realizado unicamente a fim demonstrativo, ele fornece boa base para comparação e análise da porosidade da laterita.

Os resultados apresentados na Tabela 11 deixam claro que a aplicação da técnica de dopagem reduziu em mais de 35% a porosidade do grão de laterita. Isto demonstra a

eficiência da calda de alto desempenho no tamponamento dos poros superficiais do agregado. Como reflexo deste resultado está a diminuição do valor de absorção, que também foi reduzida em 35% após a dopagem. O valor de absorção da laterita encontrado no ensaio de porosimetria (3,08%) está condizente com o resultado obtido do ensaio de absorção de água, que foi de 3,92% (Apêndice A.2).

Outro fato interessante, e que pode ser observado na Tabela 11, é a diminuição (ainda que pequena) da densidade da laterita, após esta receber o tratamento de dopagem. Esse resultado está de acordo com a diminuição da massa específica do concreto no estado fresco apresentada pelas misturas dopadas quando comparadas as controle, conforme será visto a seguir.

Na Figura 64 encontra-se a curva de distribuição de poros da amostra não dopada (em estado natural) e alguns parâmetros obtidos. Devido ao elevado grau de tamponamento dos poros, não foi possível obter a curva de distribuição de poros da amostra dopada.

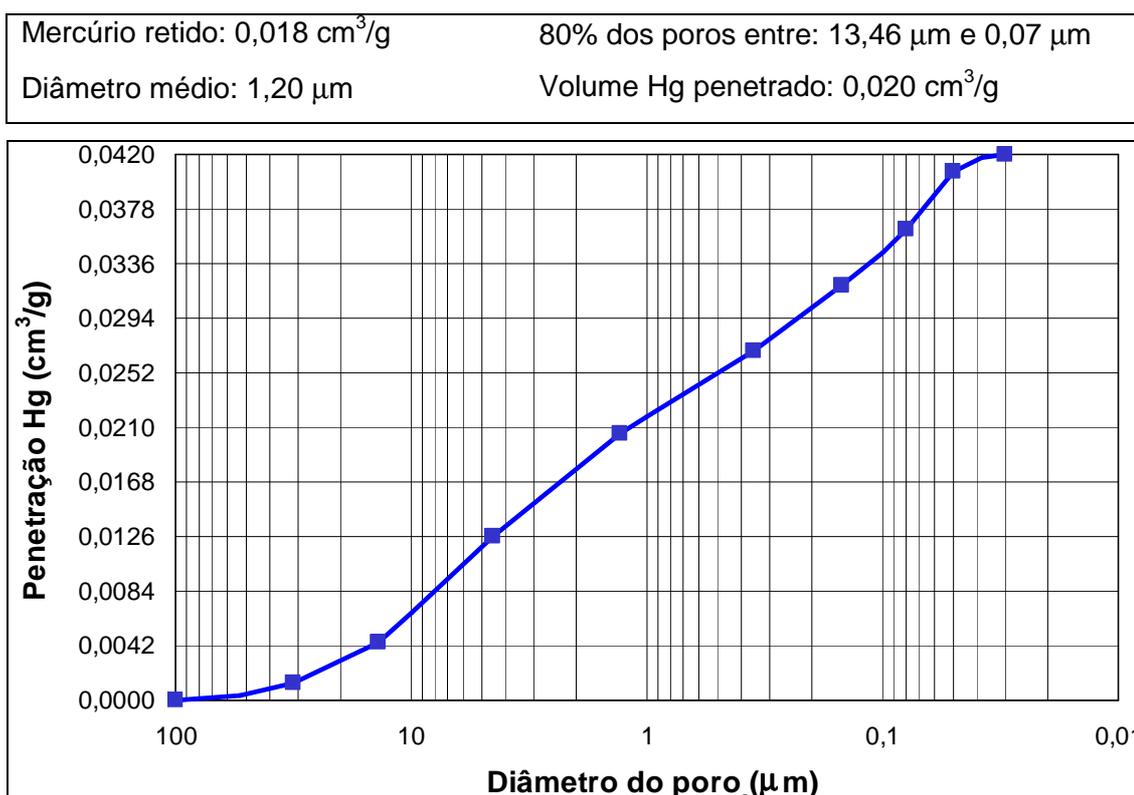


Figura 64: Volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros da amostra de laterita sem dopagem.

Diamond (2000) publicou uma severa crítica em relação ao uso das curvas de distribuição de tamanho de poros oriundas de análises feitas com porosimetria por intrusão

de mercúrio, colocando que não é possível tomar a equação de Washburn para calcular a distribuição de poros em uma matriz de cimento. Os principais problemas desta simplificação estão no fato de que esta equação considera os poros cilíndricos e que estes se comunicam de um lado a outro da amostra.

O referido autor faz uma comprovação destes fatos em análises por microscopia eletrônica de elétrons retroespalhados, exemplificando a forma irregular dos poros e a impossibilidade de ocorrer uma comunicação contínua de uma extremidade a outra da amostra. Contudo, o autor não condena o uso da técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, colocando que, para comparação entre amostras, pode-se tomar os dados de diâmetro crítico de poros e de volume de poros passíveis de serem intrudidos por mercúrio, aconselhando a descartar esta técnica como um método de medida de distribuição de tamanho de poros.

## 5.4. Dosagem dos concretos

### 5.4.1. Convenção de nomenclatura

A nomenclatura adotada para os traços expressa inicialmente o tipo de agregado por meio de letra maiúscula, L para a laterita e S para o seixo rolado. Em seguida, para os concretos de referência segue a indicação “R” de referência e para os concretos dopados segue “D” de dopado. O tipo de impregnação empregada é indicado na seqüência, denominando-se “C” para a calda de alto desempenho e “S” para a solução de água e sílica ativa. No caso específico dos concretos confeccionados com laterita, em que foram estudados traços complementares, estes são indicados pela sigla “Comp”. E no caso das diferentes composições em massa avaliadas, aparece um número no final da sigla indicando a composição, como “55” para o traço 1:5,5. Para exemplificar são mostradas algumas siglas com seus respectivos significados:

**LDS** – Concreto com laterita, dopado com solução de água e sílica ativa;

**LC-Comp1** – Concreto com laterita, controle, traço complementar 1;

**SDC-35** – Concreto com seixo rolado, dopado com calda de alto desempenho, no traço 1:3,5.

### 5.4.2. Traços de concreto controle

A determinação dos traços de concreto controle seguiu os procedimentos que vêm sendo adotados pelo grupo LMABC.

Nos traços controle não foram utilizados quaisquer tipo de aditivos ou adição mineral e como agregados estabeleceu-se o uso apenas do agregado graúdo (laterita ou seixo) e uma areia. O cimento utilizado foi o CPIII 40 RS. As relações a/c obtidas resultaram de ensaios experimentais, sendo avaliado o índice de consistência das misturas por meio do abatimento de tronco de cone conforme ABNT NBR NM 67:1998. Este parâmetro foi adotado em  $120 \pm 20$  mm. Todos os traços com laterita foram avaliados nas proporções 1:6,5, 1:5,0 e 1:3,5 e os traços lateríticos complementares na proporção 1:5,5. Já os traços com seixo rolado as proporções avaliadas foram 1:7,5, 1:5,5 e 1:3,5.

No estudo da fase agregado determinou-se o melhor empacotamento entre as partículas de cada mistura, resultando em 60% de agregado graúdo (laterita ou seixo rolado) e 40% de Areia 1. Partindo desta proporção o teor ideal de argamassa resultou em 49%. Após a mistura dos materiais, feita conforme indicado por Helene (2005), verificou-se que no concreto elaborado com seixo rolado este teor de argamassa envolveu completamente os agregados graúdos de forma que o concreto ficou trabalhável, coeso, não exsudou e apresentou bom acabamento superficial. Entretanto, no caso do concreto com laterita notou-se que este teor de argamassa foi insuficiente, sendo necessário aumentar para 57%. Desta forma, a composição entre agregados graúdos e miúdos passa a ser de 52% e 48%, respectivamente, ou seja, praticamente a composição “ideal” encontrada no ensaio de empacotamento de partículas.

Houve a necessidade de aumentar também o teor de argamassa dos traços lateríticos complementares, alterando o valor inicial de 49% para 51%. Na análise exploratória dos concretos elaborados com agregado laterítico foram estudados três traços complementares controle, sendo o primeiro com empacotamento de partículas, compondo-se as Areias 1 e 2 e o filer SM 500 (**LC-Comp1**), o segundo com uso de 2% de aditivo superplastificante ADVA Cast e 10% de sílica ativa (**LC-Comp2**) e o terceiro com associação do empacotamento e do emprego de aditivo e sílica ativa (**LC-Comp3**).

A proporção entre agregados miúdos e filer, usada nos traços complementares L-Comp1 e L-Comp3, seguiu o estabelecido no ensaio de empacotamento, conforme resultado expresso na Figura 55. Como adição mineral adotou-se o uso de 10% de sílica ativa em proporção volumétrica em relação ao total de aglomerantes, conforme discutido

nos ensaios prévios. Como aditivo optou-se pelo ADVA Cast, na proporção de 2,0 % sobre os aglomerantes (cimento e sílica ativa). Optou-se por esta proporção após a análise dos ensaios de miniabatimento de tronco de cone. O consumo de água foi estabelecido experimentalmente, procurando-se manter o índice de consistência em  $120 \pm 20$  mm.

Estabelecidos estes parâmetros obtêm-se os traços controle, cujas composições estão indicadas na Tabela 12 (concretos com laterita) e na Tabela 13 (concretos com seixo rolado), assim como alguns parâmetros considerados, índice de consistência e massa específicas destes traços.

**Tabela 12: Consumos de materiais por m<sup>3</sup> de concreto dos traços estudados com laterita (kg/m<sup>3</sup>) e alguns parâmetros e propriedades considerados.**

Material	LC	LC-Comp1	LC-Comp2	LC-Comp3	LC-35	LC-50	LC-65
Cimento	318,1	318,1	281,1	281,0	498,7	373,3	296,5
Sílica ativa	-	-	23,0	23,0	-	-	-
Fíler SM 500	-	36,8	-	36,2	-	-	-
Areia 1	736,4	454,7	723,0	446,5	507,3	587,2	631,2
Areia 2	-	244,9	-	240,4	273,2	316,2	339,8
Água	181,3	181,3	120,6	120,6	119,2	117,2	121,3
Aditivo	-	-	6,2	6,2	8,0	6,0	4,7
Laterita	1013,2	1013,2	994,7	994,7	965,1	963,1	956,2
Parâmetro							
Traço	1:5,5	1:5,5	1:5,5	1:5,5	1:3,5	1:5,0	1:6,5
Relação a/ag	0,57	0,57	0,40	0,40	0,25	0,33	0,42
Teor de argamassa (%)	51	51	51	51	57	57	57
Teor de aditivo (%)	-	-	2,0	2,0	1,6	1,6	1,6
Propriedade							
Consistência (K) (cm)	10,0	8,0	13,0	9,0	13,5	11,0	9,0
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	*	*	*	*	2396	2375	2360

\*devido ao pequeno volume de concreto confeccionado em argamassadeira não foi possível realizar o ensaio de massa específica para os traços com laterita

**Tabela 13: Consumos de materiais por m<sup>3</sup> de concreto dos traços estudados com seixo rolado (kg/m<sup>3</sup>) e alguns parâmetros e propriedades considerados.**

Material	SC-35	SC-55	SC-75
Cimento	483,4	341,4	260,4
Areia 1	582,5	746,0	824,2
Água	193,4	170,7	169,3
Seixo rolado	1109,4	1131,7	1128,8
Parâmetro			
Traço	1:3,5	1:5,5	1:7,5
Relação a/ag	0,40	0,50	0,65
Teor de argamassa (%)	49	49	49
Propriedade			
Consistência (K) (cm)	13,5	12,5	14,0
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2408	2399	2381

Analisando os resultados de consistência dos traços com seixo rolado nota-se que os valores ficaram entre 12,5 e 14,0 centímetros, dentro do limite estipulado ( $120 \pm 20$  mm) e julgado compatível com um adequado lançamento e adensamento. Para que o índice de consistência do traço com laterita (LC) ficasse dentro do limite foi necessário utilizar relação a/c de 0,57, ou seja, um pouco maior que a relação 0,50 utilizada no traço com seixo (SC-55), para a mesma composição 1:5,5. Comparado ao seixo rolado, a textura mais rugosa e o formado mais lamelar da laterita justificam o aumento na demanda de água do concreto.

Não houve preocupação quanto aos valores de consistência dos traços complementares de laterita estarem fora dos limites estabelecidos, pois o objetivo foi comparar traços com a mesma quantidade de água, analisando especificamente o efeito do empacotamento de partículas (comparação dos traços LC e LC-Comp1), da adição de aditivo e sílica ativa (comparação dos traços LC e LC-Comp2) e dos dois parâmetros conjuntos (comparação dos traços LC e LC-Comp3).

Em todos os traços estudados não foi observada ocorrência de segregação ou de exsudação do concreto.

### 5.4.3. Traços de concreto dopado

Os traços de concreto dopado foram elaborados com o mesmo consumo de materiais dos traços controle (conforme apresentado na Tabela 12 e na Tabela 13), sendo que a diferença esteve no uso dos agregados previamente dopados ao invés dos agregados *in natura*. Para fins comparativos, os valores de teor ideal de argamassa e de relações a/c determinados para os traços controle foram mantidos para os respectivos traços dopado, independente da consistência obtida.

Em todos os traços controle apresentados anteriormente a técnica de dopagem dos materiais foi aplicada. As mesmas variações estudadas nos respectivos traços lateríticos controle (empacotamento de partículas, aditivo superplastificante, sílica ativa) foram avaliadas conjuntamente com a técnica de dopagem para os concretos dopados lateríticos.

No caso específico da composição 1:7,5 com seixo rolado, foram elaborados dois traços dopados: um confeccionado quando a impregnação estava próxima de atingir seu início de pega, denominado de **SD-75-IP** e outro confeccionado quando a impregnação estava com 24 horas, denominado de **SD-75-FP**.

Considerando o processo produtivo, o uso do agregado na condição de dopagem com 24 horas mostra-se mais vantajoso à medida que permite que este agregado tratado seja estocado em silos e posteriormente transportado para as obras de construção. Surge assim a possibilidade de comercialização de um novo agregado, com características modificadas a depender da situação, cujo aspecto mostra-se promissor. Entretanto, se forem consideradas as reações de hidratação do cimento, o uso do agregado nesta condição pode não ser tão atrativo, ou até mesmo impraticável, visto que provavelmente será criada uma barreira física que dificultará e/ou impedirá as aderências química e física da calda de impregnação à pasta do concreto. E, neste caso, o uso do agregado na condição de “início de pega” torna-se mais apropriado.

Baseado nos resultados mecânicos e microestruturais dos concretos SD-75-IP e SD-75-FP, verificou-se que o instante próximo ao início de pega da calda de alto desempenho proporcionou melhor desempenho ao concreto SD-75-IP. Estes resultados serão apresentados nas seções 5.6. (Avaliação das propriedades mecânicas) e 5.7. (Avaliação das propriedades microestruturais). Desta forma, todos os concretos dopados (lateríticos e com seixo) foram confeccionados quando o instante da calda de impregnação estava próximo de atingir o início de pega. Além disso, a comparação dos resultados dos traços lateríticos dopados (LDC e LDS) permitiu escolher entre o melhor procedimento de

impregnação – calda de alto desempenho (LDC) ou solução de água e sílica ativa (LDS) – sendo aplicado aos concretos lateríticos.

Os valores de índice de consistência e massa específicas dos traços de concreto dopado com laterita e seixo rolado podem ser vistos respectivamente na Tabela 14 e na Tabela 15.

**Tabela 14: Propriedades dos traços de concreto laterítico dopado no estado fresco.**

Propriedade	LDC	LDS	LD-Comp1	LD-Comp2	LD-Comp3	LD-35	LD-50	LD-65
Consistência (K) (cm)	13,0	15,0	12,0	18,5	14,0	15,0	14,0	14,5
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	*	*	*	*	*	2378	2343	2341

\*devido ao pequeno volume de concreto confeccionado em argamassadeira não foi possível realizar o ensaio de massa específica para os traços com laterita

**Tabela 15: Propriedades dos traços de concreto com seixo dopado no estado fresco.**

Propriedade	SD-35	SD-55	SD-75-IP	SD-75-FP
Consistência (K) (cm)	15,5	17,0	19,5	16,0
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2372	2369	2360	2378

Analisando a Tabela 14 e a Tabela 15, observa-se que as consistências da maior parte dos traços dopados ultrapassaram o limite de  $120 \pm 20$  mm, entretanto tais valores foram aceitos uma vez que se priorizou não alterar a relação a/agl destas misturas para efeitos comparativos com os respectivos traços controle. Nota-se também aumento no índice de consistência dos traços dopados se comparados aos controles, que pode estar associado à maior lubrificação das partículas devido ao estado dopado em que se encontravam no instante de mistura com os demais materiais do concreto. Outra explicação para o aumento no índice de consistência dos traços dopados está na atuação do superplastificante presente na camada de impregnação, dando indício de reação entre esta camada e a pasta do concreto, o que poderia estar associado à perda da camada, algo que não foi observado na laterita, mas sim em algumas micrografias do concreto com seixo, conforme será visto na seção 5.7.2. (Resultados microestruturais do seixo rolado).

Apesar de todos os concretos dopados terem alcançado altos índices de abatimento, eles apresentaram grande coesão, sem qualquer indício de segregação.

Quanto à massa específica dos concretos, observa-se que os valores dos traços dopados apresentaram ligeira queda (em torno de 2%) se comparados aos dos respectivos traços controle. A menor massa específica observada é resultante da maior quantidade de pasta de cimento proveniente da dopagem dos agregados, substituindo-se agregados mais densos por combinação menos densa de agregados e pasta de cimento.

#### 5.4.4. Procedimentos de mistura

Baseado em prática utilizada por pesquisadores do LMABC os traços de concreto controle foram confeccionados obedecendo a seguinte seqüência:

- Adição do agregado graúdo, aglomerantes (cimento, sílica ativa) e 70% da água de amassamento. Homogeneização dos materiais em misturador mecânico por 6 minutos.
- Adição dos agregados miúdos (e fíler, quando for o caso) e 30% da água de amassamento. Homogeneização final dos materiais por 4 minutos, totalizando 10 minutos de mistura.

As principais etapas da confecção dos concretos controles estão na Figura 65.



**Figura 65: Etapas principais da confecção dos concretos controles com laterita (linha superior) e com seixo rolado (linha inferior): agregado graúdo, aglomerantes e água homogeneizados (à esq.) e mistura final (à dir.).**

Já os traços de concreto dopado foram confeccionados de acordo com a ordem de mistura:

- Adição dos aglomerantes e 70% da água de amassamento e homogeneização dos materiais em misturador mecânico por 3 minutos.
- Adição dos agregados miúdos e 30% da água de amassamento e homogeneização dos materiais por 4 minutos.
- Adição do agregado graúdo dopado e homogeneização final dos materiais por 3 minutos, totalizando 10 minutos de mistura.

As principais etapas desta confecção são apresentadas na Figura 66, lembrando que a adição do agregado dopado na mistura só ocorreu após certificação de permanência da camada de impregnação ao redor do agregado, sendo realizada em instante próximo ao início de pega da calda de alto desempenho.



**Figura 66: Etapas da confecção dos concretos dopados elaborados com laterita (linha superior) e com seixo rolado (linha inferior): aglomerantes, agregados miúdos e água homogeneizados (à esq.), lançamento do agregado dopado (centro) e mistura final (à dir.).**

Ao confeccionar os concretos lateríticos, observou-se nítida diferença na coloração dos traços controle e dopado. Independente da dosagem do traço, todos os concretos controles apresentaram coloração avermelhada, proveniente do desgaste da laterita, ao passo que os concretos dopados permaneceram com coloração esverdeada (padrão de concretos convencionais). Este é o primeiro indício de sucesso da aplicação da técnica de

dopagem dos agregados, significando diminuição do atrito entre as partículas e proteção superficial das mesmas. Ao comparar corpos de prova cilíndricos moldados nos dois traços fica clara a diferença de coloração, conforme visualizado na Figura 67.



**Figura 67: Diferença na coloração dos concretos lateríticos controle (coloração avermelhada) e dopado (coloração esverdeada).**

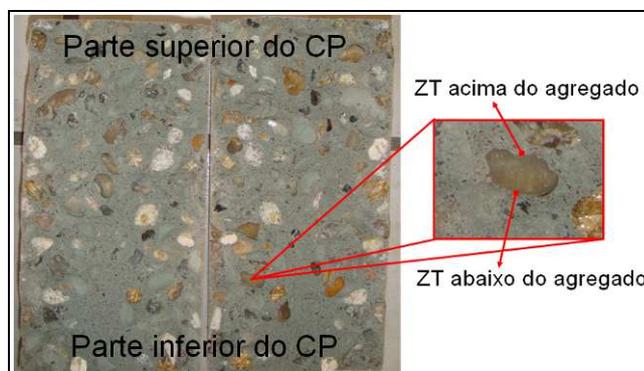
O agregado laterítico vem compondo concretos estruturais cuja aplicação está em edificações de pequeno porte e trechos de rodovias (Oliveira e colaboradores, 2011). Entretanto, a possibilidade de explorar o potencial da laterita em concretos aparentes, compondo peças estruturais e/ou não, é muito promissora. Se utilizada em seu estado natural, a laterita pode proporcionar concretos em tons avermelhados, sem que haja necessidade de adicionar qualquer pigmento à mistura (ocorrerá o desgaste natural do agregado durante a confecção do concreto). E o potencial de utilização se torna mais atrativo para o caso de emprego da laterita em estado dopado, uma vez que peças aparentes poderão exibir os pontos avermelhados da laterita na massa acinzentada da argamassa.

As perspectivas de aplicação do concreto laterítico aparente mencionado são muitas: desde paredes, pilares, vigas e lajes de uma edificação convencional, até colunas, portais, fachadas, pisos e escadas de obras de grande porte, ou ainda peças estruturais de pontes e viadutos, sem contar os artefatos de concreto, tais como telhas, banheiras, esculturas e móveis em geral.

## 5.5. Preparação das amostras microestruturais

As amostras de concreto foram retiradas dos corpos de prova rompidos, aos 28 dias de idade, à tração por compressão diametral, julgando-se importante observar a zona de transição pasta/agregado acima e abaixo do agregado, conforme Figura 68, dada a

ocorrência de película de água proveniente de exsudação interna e provável diferença existente nestas regiões.



**Figura 68: Destaque das zonas de transição pasta/agregado estudadas.**

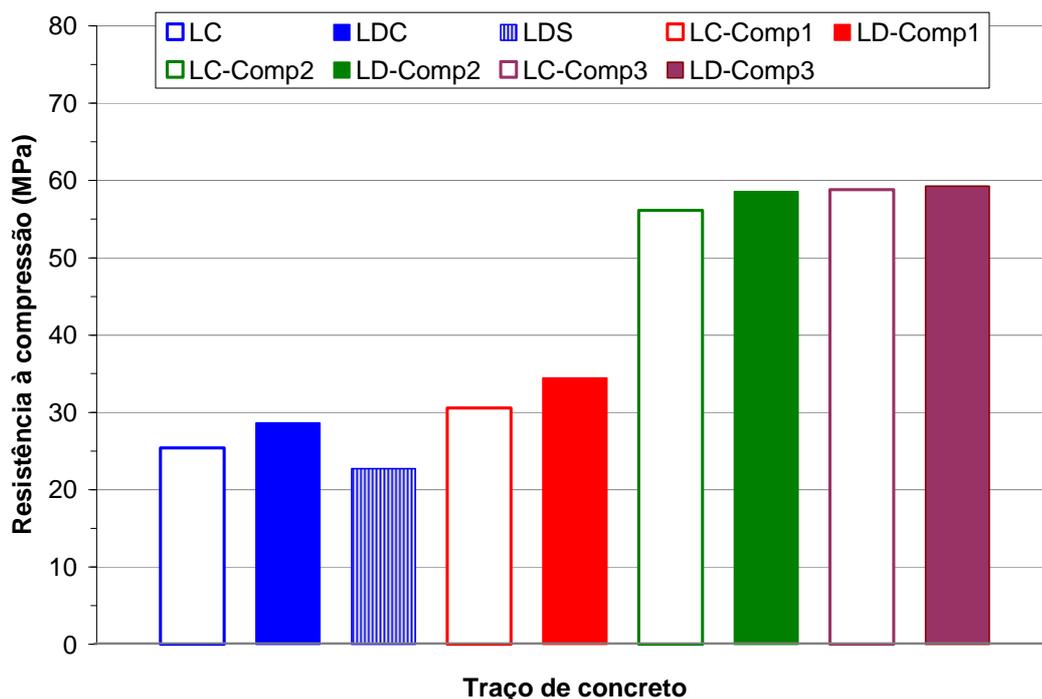
Para cada tipo de agregado estudado, foram preparadas duas amostras fraturadas de concreto para cada traço controle e duas para cada traço dopado, além de mais duas amostras polidas também para cada traço de concreto controle e dopado, conforme procedimento apresentado em detalhes na seção 4.5. (Preparação de amostras microestruturais).

## **5.6. Avaliação das propriedades mecânicas**

Os resultados mecânicos do concreto (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade) e os resultados de absorção de água por imersão, apresentados a seguir têm o intuito de evidenciar os ganhos de desempenho obtidos com a técnica de dopagem aplicada.

### **5.6.1. Resistência à compressão**

Na Figura 69 são mostrados os valores de resistência aos 28 dias de idade dos traços exploratórios elaborados com laterita e denominados de complementares.



**Figura 69: Resistência à compressão, aos 28 dias de idade, dos concretos com laterita.**

A decisão de dopar os agregados graúdos lateríticos com calda de alto desempenho foi tomada com base nos resultados de resistência dos traços LDC e LDS (Figura 69) – a resistência à compressão do traço impregnado com calda (LDC) foi 26,2% superior à do impregnado com solução de água e sílica ativa (LDS) – e também com base na restrição de fixação da própria sílica ativa na superfície da laterita ou de qualquer outro agregado, dificultando o processo de dopagem. Por ser uma adição mineral inerte, a sílica não permanece aderida ao agregado após a confecção do concreto e a pasta da região de interface, que somente deveria ser melhorada, passa a dividir a sílica com toda a matriz do concreto, resultando em um ganho insignificante para este por estar em pequena quantidade. Em uma composição 1:5,5, o teor de 10% de sílica ativa presente na calda de impregnação da laterita cai para aproximadamente 5% quando dispersa em todo o concreto.

Cabe mencionar por que a presença de 5% de sílica ativa no concreto LDS, considerando dispersão da sílica em toda a massa deste concreto, não aumentou a resistência; ao contrário disso, observou-se queda de 10,6% se comparada à resistência do respectivo traço controle (LC). Uma possível explicação é que ao adicionar a laterita em condição saturada superfície seca tenha ocorrido acúmulo de água localizado na zona de transição pasta/agregado, prejudicando o desempenho do concreto pela diminuição de qualidade dessa região.

Os resultados dos concretos lateríticos complementares permitiram avaliar o efeito individual do empacotamento de partículas (LC-Comp1 e LD-Comp1) e da adição de aditivo superplastificante e sílica ativa (LC-Comp2 e LD-Comp2), além do efeito conjunto de ambos (LC-Comp3 e LD-Comp3). Considerando como comparativo o concreto LC, que foi confeccionado com apenas uma areia e sem qualquer adição de superplastificante ou sílica ativa, observa-se que ao empacotar as partículas dos agregados (três areais e um fíler) o ganho de resistência conseguido foi em torno de 20,4% e é justificado pela diminuição de 8,8% no índice de vazios deste concreto (LC-Comp1).

O ganho de resistência mais pronunciado ocorreu ao utilizar 2,0% de superplastificante ADVa Cast e 10% de sílica ativa em substituição volumétrica ao cimento (LC-Comp2). Neste caso, o aumento superou os 120%. A combinação de empacotamento e uso de adições, química e mineral, auxiliou ainda mais para o incremento de resistência (aumento de 131,6%), chegando próximo a 60 MPa (LC-Comp3). De maneira análoga, o mesmo raciocínio pode ser aplicado aos traços complementares dopados, comparando-os com o traço dopado LDC.

É interessante notar que o traço LD-Comp1, apesar de ter maior relação  $a/agl$  (0,57) e ser confeccionado com agregado menos resistente (laterita), teve aos 28 dias seus resultados equiparados com o traço de mesma composição (SD-55) só que elaborado com menor relação  $a/agl$  (0,40) e com agregado mais resistente (seixo rolado). A explicação principal está no efeito benéfico, e já conhecido, do empacotamento de partículas e, além disso, a melhor rugosidade da superfície da laterita contribui para a aderência deste agregado com a pasta de cimento. Concretos produzidos com agregados britados chegam a apresentar resistência 15% superior do que aqueles produzidos nas mesmas constituições, mas com agregados rolados (HARRISON; BLOODWORTH, 1994).

Visto que todos os concretos dopados tiveram índices de consistência superiores aos dos concretos controles, pensou em reduzir a quantidade de água destes traços dentro dos limites de consistência de  $12 \pm 2$  cm estabelecidos e ver se esta alteração traria ganho de resistência ao concreto. Desta forma, testou-se um traço auxiliar nas mesmas dosagens do traço LD-Comp3, mas empregando-se relação  $a/agl$  igual a 0,35 ao invés de 0,40. A resistência à compressão obtida aos 28 dias de idade foi de 59,62 MPa. Com isto, concluiu-se que a resistência máxima de 60 MPa do concreto está sendo limitada pela resistência do agregado laterítico. Caso sejam necessárias maiores resistências, a solução é substituir o agregado graúdo menos resistente pela argamassa mais resistente, ou seja, aumentando-se o teor de argamassa.

Comparando o efeito da técnica de dopagem nos diversos traços estudados, percebe-se que a contribuição ocorre em todos os casos, independente se existe ou não outras técnicas associadas. O ganho de resistência só não foi observado entre os traços LC-Comp3 e LD-Comp3 pelo fato do limite da resistência do agregado ter sido atingido.

A associação da técnica de dopagem dos materiais com procedimentos relacionados à tecnologia do concreto (empacotamento de partículas e adição de superplastificantes e adições minerais) permitiu que fossem produzidos concretos estruturais e de alto desempenho com agregado laterítico, atingindo o objetivo do estudo. Isto foi possível graças à matriz de alto desempenho criada, que foi capaz de envolver o agregado deficiente proporcionando a dopagem do concreto como um todo. Embora não tenham sido realizados ensaios de durabilidade que confirmem o alto desempenho do concreto com laterita (a não ser pelo ensaio de absorção de água que será visto na seqüência), a afirmação é feita com base no alto desempenho da matriz deste concreto. Desempenho este cientificamente comprovado em inúmeras pesquisas desenvolvidas pelo grupo LMABC com concretos elaborados com matrizes cimentícias semelhantes, conforme apresentado na Tabela 16.

**Tabela 16: Exemplos de estudos desenvolvidos pelo grupo LMABC, cujos concretos possuem matrizes semelhantes à matriz utilizada neste estudo.**

Autor	Traço	$f_{c,28}$ (MPa)	E (GPa)	Observações
Silva (2000)	1:6,5:0,5 (CPV ARI; 10% sílica ativa)	59,1	32,1	Melhoria de 50% na resistência à abrasão e resistência química sob ação de soluções ácidas e básicas revelou-se extremamente satisfatória
	1:6,5:0,5 (CPV ARI-RS; 10% sílica)	56,7	33,0	
Silva (2007)	1:4,64:0,4 (CP II-E-32; 10% sílica ativa; 0,4% superplastificante)	48,9	46,3	Redução estatisticamente significativa na abertura das fissuras das vigas e concreto com porosidade refinada, refletindo em aumento na durabilidade do material
Castro (2007)	1:3,5:0,40 (CPV ARI; 10% sílica ativa; 0,6% superplastificante)	50,5	46,0	Caracterização reológica de concretos de alto desempenho, definidos com base em estudo de Silva (2000)
	1:3,5:0,40 (CPV ARI-RS; 10% sílica ativa; 0,6% superplastificante)	46,7	42,0	
Pereira (2010)	1:5,3:0,49 (CPV ARI-RS; 10% sílica + metacaulinita; 1,7% superplastificante)	67,3	41,0	Houve empacotamento de agregados. O refinamento do sistema de poros foi verificado a partir dos resultados de absorção, da forma do diagrama tensão-deformação e do lascamento explosivo dos concretos. A absorção por imersão apresentou valores médios de 1,32%; considerados muito baixos, sendo os concretos considerados duráveis para valores menores que 4,2%
Rebmann (2011)	1:6,7:0,44 (CPV ARI; 10% sílica ativa; 2,0% superplastificante)	67,9	51,4	Concreto com baixo consumo de cimento ( $280 \text{ kg/m}^3$ ), empacotamento de partículas e durabilidade comprovada pelo autor por meio de ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, permeabilidade, abrasão, carbonatação e potencial de corrosão
	1:6,7:0,44 (CPIII 40 RS, 10% sílica ativa; 2,0% superplastificante)	55,4	50,8	

Nas Figura 70 e Figura 71 são mostradas, respectivamente, as evoluções de resistência à compressão dos traços lateríticos e dos traços com seixo rolado.

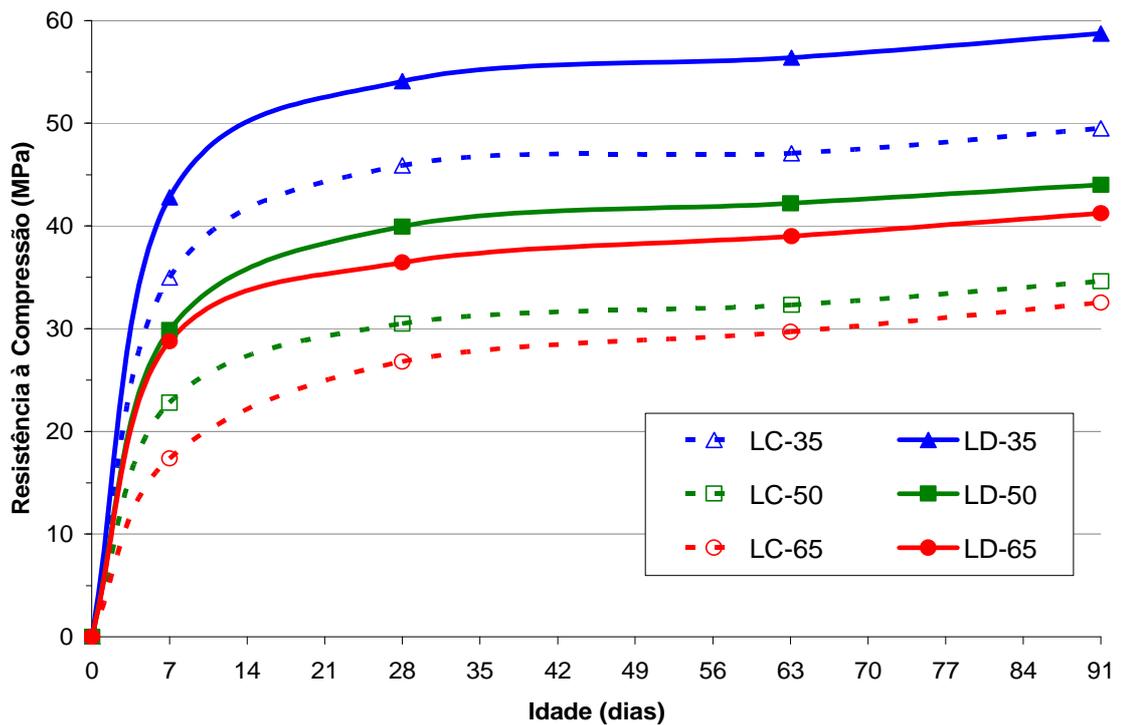


Figura 70: Evolução da resistência à compressão com a idade dos concretos lateríticos.

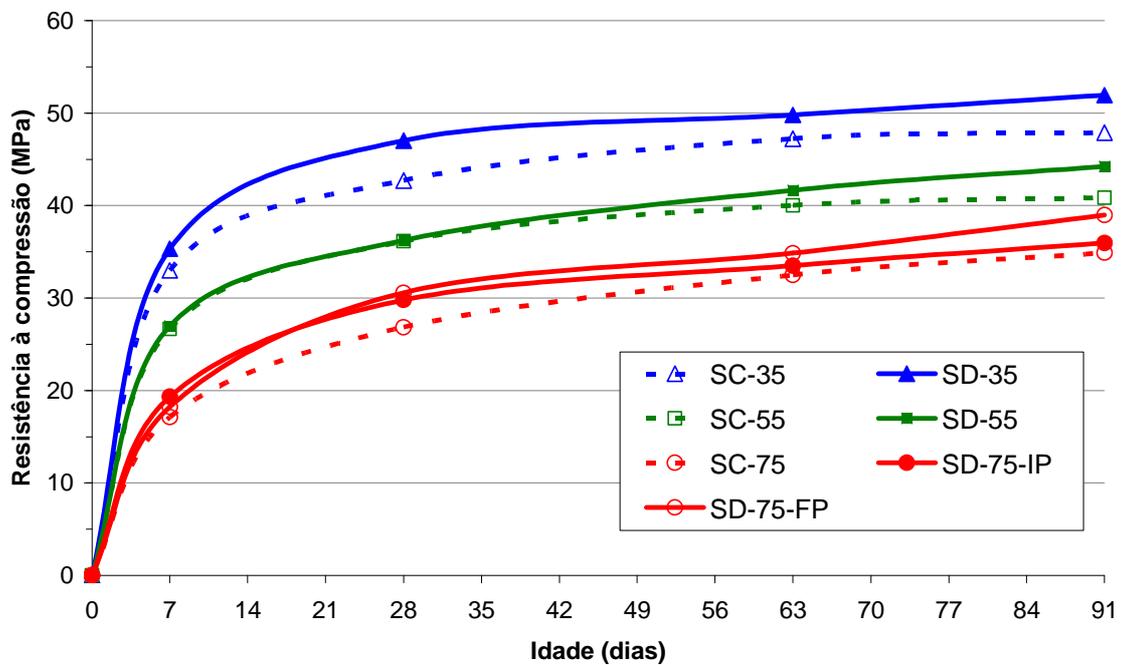


Figura 71: Evolução da resistência à compressão com a idade dos concretos com seixo rolado.

Para qualquer idade analisada e independente do tipo de agregado graúdo usado observa-se que os valores de resistência à compressão dos concretos dopados foram maiores que os valores dos concretos de referência (controles), demonstrando o incremento de resistência ao aplicar a técnica de dopagem dos materiais (Figura 70 e Figura 71). O ganho médio foi mais pronunciado para concretos com laterita, em torno de 28%, e foi mais discreto para concretos com seixo rolado, em torno de 7%. Embora este último valor não pareça significativo, ele é reflexo de melhoria real na zona de transição entre o seixo e a matriz do concreto, representando possibilidade de uso para muitos agregados alternativos até então pouco ou nada explorados.

Um fato interessante a ser mencionado, e que pode ser visualizado na Figura 70, é o desempenho mecânico do concreto laterítico no traço 1:6,5. Apesar de ser um traço pobre, seus valores de resistência à compressão se equiparam aos do traço 1:5,0 (nas respectivas idades), que, comparativamente, é um traço mais rico. Os traços mais pobres exigem maior quantidade de água, mas em contrapartida têm uma quantidade de cimento Portland muito menor que os traços mais ricos. Como há uma quantidade menor de  $C_3A$  e  $C_4AF$ , o aditivo superplastificante utilizado será tanto mais eficiente na mistura, chegando-se a resistências mecânicas, para esses traços mais pobres, que superam os traços médios ou mais ricos (MELO, 2000; TIBONI, 2007).

Ao analisar a evolução da resistência com a idade dos concretos com seixo rolado (Figura 71), nota-se o ganho de resistência após os 28 dias; justificado pela presença da escória no cimento CPIII 40 RS, que implica em reações de hidratação mais lentas.

Com relação à comparação dos traços SD-75-IP e SD-75-FP, pode-se dizer que até os 63 dias de idade ambos tiveram o mesmo comportamento, não representando diferença entre utilizar agregados com impregnação em início de pega ou impregnados há 24 horas. Somente em idade avançada que o traço SD-75-FP se destacou, superando em 8,4% o valor do respectivo traço controle (SC-75). Entretanto, não seria prudente escolher o traço SD-75-FP, já que os resultados não fornecem subsídios suficientes para afirmar que a impregnação no final da pega é a melhor também em termos microestruturais. Observando e avaliando as imagens microscópicas – fundamentais para esta decisão – adotou-se o início de pega como o instante mais adequado para realizar a mistura do agregado dopado ao concreto. Os concretos SD-55 e SD-35 e todos os concretos lateríticos foram dopados com base nestes resultados.

Embora as resistências dos concretos elaborados com seixo rolado tenham sido menores que 50 MPa aos 28 dias de idade, cabe lembrar que o potencial deste agregado não foi totalmente explorado, sendo perfeitamente possível atingir resistências bem maiores

que esta, já que a resistência do seixo é praticamente duas vezes maior que a da laterita usada nos concretos que atingiram 60 MPa. Para isto basta utilizar os mesmos procedimentos de empacotamento de partículas e uso de aditivos e adições aplicados aos concretos lateríticos complementares. E novamente, com isto cria-se uma matriz de alto desempenho capaz de sanar qualquer tipo de deficiência que o agregado apresente, resultando em concretos de alto desempenho.

Na maioria das obras correntes pode-se perfeitamente empregar os concretos confeccionados com laterita ou seixo rolado, desde que empregada a técnica de dopagem dos materiais, visto que todos os concretos dopados superaram a marca de 30 MPa, aos 28 dias de idade, resistência considerada limite para classe de agressividade III da ABNT NBR 6118:2007, que é um dos critérios estabelecidos pela norma.

### 5.6.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral foram obtidos aos 28 e 63 dias de idade. A Tabela 17 e a Tabela 18 mostram os valores dos corpos de prova de concreto laterítico complementar e concreto laterítico. Na Tabela 19 estão os valores de resistência à tração dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.

**Tabela 17: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico complementar.**

	LC	LDC	LDS	LC- Comp1	LD- Comp1	LC- Comp2	LD- Comp2	LC- Comp3	LD- Comp3
28 dias	2,18	2,57	2,06	2,31	2,44	3,44	3,49	3,48	3,50

**Tabela 18: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico.**

	LC-35	LD-35	LC-50	LD-50	LC-65	LD-65
28 dias	3,48	3,55	2,65	3,02	2,26	2,80
63 dias	3,86	3,94	2,87	3,28	2,49	3,12

**Tabela 19: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.**

	SC-35	SD-35	SC-55	SD-55	SC-75	SD-75-IP	SD-75-FP
28 dias	2,81	2,93	2,31	2,54	2,20	2,43	2,63
63 dias	2,98	3,12	2,65	2,89	2,44	2,67	3,13

Os resultados das Tabela 18 e Tabela 19 mostram que ao realizar a dopagem no agregado todos os traços estudados apresentaram aumento nos valores de resistência à tração, com exceção do concreto laterítico dopado com solução de água e sílica ativa (LDS), que, assim como verificado no ensaio de resistência à compressão, apresentou desempenho inferior se comparado ao respectivo concreto controle (LC). A técnica de dopagem representou incremento médio de 13,6% para o concreto com laterita (Tabela 18) e de 9,6% para o concreto com seixo (Tabela 19).

Examinando os concretos com seixo rolado (Tabela 19), aos 28 dias de idade, são encontrados aumentos em torno de 10% para os traços 1:7,5 e 1:5,5 (concretos SC-75, SD-75-IP, SC-55 e SD-55), enquanto o traço 1:3,5 teve aumento de 4% após aplicação da técnica (concretos SC-35 e SD-35). O mesmo raciocínio pode ser aplicado aos concretos lateríticos (Tabela 18), que aos 28 dias de idade apresentaram aumentos de 24%, 14% e 2%, respectivamente para os traços 1:6,5, 1:5,0 e 1:3,5. Isto leva a crer que na resistência à tração por compressão diametral o efeito da técnica de dopagem é mais pronunciado em traços mais pobres, independente do agregado graúdo.

O concreto elaborado com seixo rolado dopado há 24 horas (SD-75-FP) apresentou maior resistência à tração que os concretos controle (SC-75) e dopado em instante de início de pega (SD-75-IP). Uma possível explicação para isto é que se criou um novo agregado (pelo fato da calda de impregnação já estar endurecida) com características superficiais melhoradas, especialmente a rugosidade, conforme visto na Figura 63, que contribuiu para a aderência entre o agregado e a matriz do concreto. Apesar disso, e conforme mencionado anteriormente, o instante adotado para realizar a mistura do agregado dopado ao concreto foi o de início de pega da calda.

Analisando os traços complementares executados com laterita (Tabela 17), se for considerado somente o efeito da técnica de dopagem nos traços com laterita, o aumento da resistência à tração foi de 18% (traços LC e LCD), associando a técnica com o empacotamento de partículas, o aumento foi de 6% (traços LC-Comp1 e LD-Comp1), com o uso de adições, 1% (traços LC-Comp2 e LD-Comp2) e finalmente associando-a com os dois procedimentos, o aumento foi de 3% (traços LC-Comp3 e LD-Comp3).

### 5.6.3. Resistência à tração na flexão

Na Tabela 20 e na Tabela 21 apresentam-se os resultados de resistência à tração, obtidos em ensaio de flexão com aplicação de carga nos terços do vão. Notam-se boas resistências obtidas, sendo que os concretos com dopagem superaram os concretos de referência. Para uso dos concretos em situações de maior exigência de resistência à tração na flexão, como é o caso de pavimentos de rolagem de aeroportos e avenidas, especificam-se resistências aos 28 dias na ordem de 5,5 a 6,0 MPa e nos casos de menor exigência, como pisos industriais em geral, 4,0 a 5,5 MPa (MATTOS, 2004). A maioria dos concretos elaborados com aplicação da técnica de dopagem atende a esta especificação mais exigente.

Ganhos de resistência da ordem de 10 a 20 % foram observados dos 28 aos 63 dias para os concretos estudados, independente do agregado utilizado.

**Tabela 20: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos concretos lateríticos estudados.**

	LC-35	LD-35	LC-50	LD-50	LC-65	LD-65
28 dias	5,2	7,0	4,2	5,8	3,6	5,5
63 dias	6,3	7,7	4,9	6,4	4,1	6,0

**Tabela 21: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos concretos com seixo rolado estudados.**

	SC-35	SD-35	SC-55	SD-55	SC-75	SD-75-IP
28 dias	5,3	6,4	4,6	5,0	4,0	4,6
63 dias	6,4	7,3	5,4	5,7	4,5	5,1

### 5.6.4. Módulo de elasticidade

Os módulos de elasticidade foram obtidos para os concretos lateríticos e com seixo rolado, sendo os valores médios mostrados respectivamente na Tabela 22 e na Tabela 23.

Nota-se que os valores de módulo de elasticidade diminuíram ao aplicar a técnica de dopagem dos materiais, sendo a queda média igual a 15% no caso do concreto elaborado com laterita (Tabela 22) e igual a 8,0% no caso do concreto com seixo rolado (Tabela 23).

**Tabela 22: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto laterítico.**

	LC-35	LD-35	LC-50	LD-50	LC-65	LD-65
28 dias	42,13	36,35	35,06	29,91	34,71	30,72
63 dias	42,84	37,11	35,50	30,84	34,97	30,85

**Tabela 23: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.**

	SC-35	SD-35	SC-55	SD-55	SC-75	SD-75-IP	SD-75-FP
28 dias	39,39	36,44	37,08	32,95	33,74	31,62	31,28
63 dias	40,13	38,07	36,89	33,06	36,05	33,98	35,53

O módulo de elasticidade do concreto é, geralmente, tanto maior quanto maior o módulo dos agregados graúdos e o percentual que o constitui (NEVILLE, 1997). O módulo de elasticidade vem diretamente da relação tensão-deformação do material. Em materiais heterogêneos, multifásicos como o concreto, a fração volumétrica, a massa específica e o módulo de elasticidade dos principais constituintes e as características da zona de transição determinam o comportamento elástico do composto.

Baseado no exposto, a diminuição do módulo verificada pode ser atribuída ao uso do agregado dopado nestas misturas. Ao impregnar o agregado (laterita ou seixo rolado) com calda de alto desempenho, passa a influenciar no resultado de módulo de elasticidade o conjunto agregado + calda. Neste caso, provavelmente a camada de dopagem foi responsável pelo acréscimo de deformação do concreto.

Essa ideia é similar ao que ocorre em concretos confeccionados com agregados de construção e demolição. Devido à grande quantidade de argamassas de pequeno módulo de elasticidade aderida aos agregados reciclados, o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com este material é sempre menor que o do concreto de referência (HANSEN, 1986). Segundo Levy (1997), este valor está compreendido entre 10 e 40%.

O módulo de elasticidade de um concreto convencional pode variar de 14 GPa a 40 GPa (METHA; MONTEIRO, 1994), enquanto o módulo de um concreto de alto desempenho pode chegar a 59 GPa para resistências à compressão acima de 120 MPa (AÏTCIN, 2000). Silva (2000) atingiu valores de módulo de elasticidade de 54 GPa, para valores de resistência à compressão menores que 120 MPa, porém com uma matriz de excelente qualidade. Silva (2006), em programa experimental, conseguiu módulo de elasticidade de 36

GPa para traço de concreto 1:3,5 confeccionado com cimento CPV ARI e sem sílica ativa e, após adicionar 10% de sílica de Fe-Si, o mesmo traço resultou em 43 GPa, aos 28 dias de idade. Rebmann (2011) atingiu módulo de elasticidade de 51 GPa aos 28 dias e 60 GPa aos 63 dias de idade para concreto com 70 MPa de resistência à compressão e consumo de cimento CPV ARI de 280 kg/m<sup>3</sup>.

Na Tabela 22 é possível constatar que o traço de concreto 1:3,5, confeccionado com laterita não dopada (LC-35), apresentou valor de módulo de elasticidade superior a 40 GPa, indicando a alta qualidade da matriz cimentícia.

Com relação ao seixo rolado, o maior valor de módulo de elasticidade conseguido refere-se também ao concreto controle no traço 1:3,5 (SC-35), cujo resultado alcançou 39,39 GPa (Tabela 23). Apesar de esse valor enquadrá-lo como concreto convencional, deve-se considerar que não houve emprego de qualquer tipo de adição mineral (sílica ativa) ou aditivo ou ainda empacotamento de partículas, e, levando-se em consideração que valores próximos a 40 GPa são encontrados em concretos convencionais, produzidos com brita basáltica, pode-se dizer que todos os concretos estudados neste estudo, feitos com seixo rolado, apresentaram bons resultados.

As dopagens em instante de início de pega e com 24 horas proporcionaram traços de concreto praticamente com o mesmo desempenho quanto ao módulo de elasticidade.

### **5.6.5. Absorção de água por imersão**

O ensaio de absorção de água por imersão mede o volume de vazios abertos, dando uma ideia da porosidade do concreto.

Devido ao fato de a absorção não poder ser relacionada diretamente com a permeabilidade, a absorção não pode, portanto, ser usada como medida direta da qualidade de um concreto. Mesmo assim observa-se que grande parte dos concretos de boa qualidade tem absorção bem abaixo de 10 % (NEVILLE, 1982).

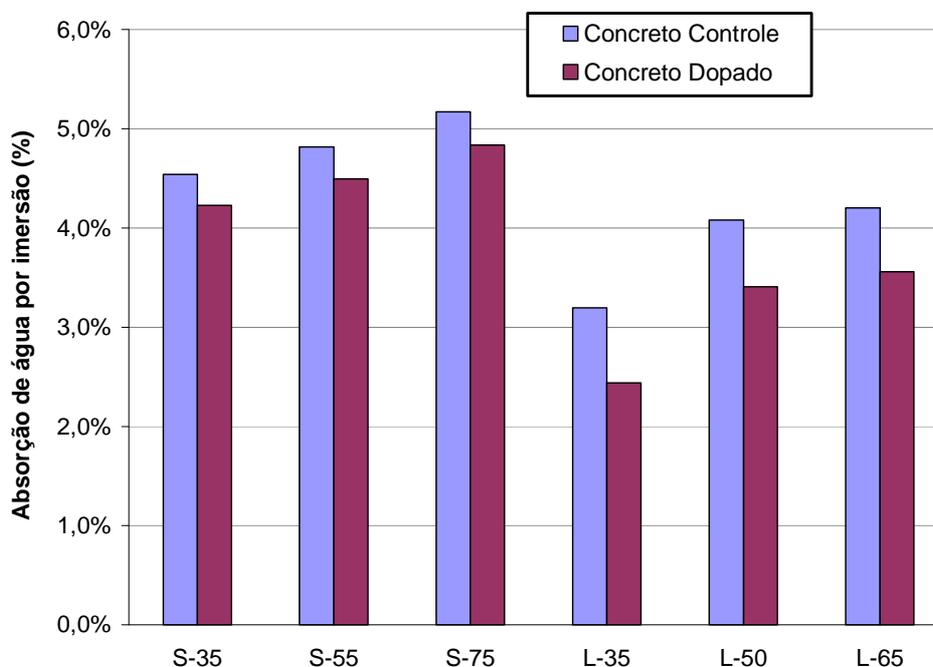
Antes de apresentar os resultados obtidos, devem-se mencionar algumas recomendações que relacionam a absorção com durabilidade (Tabela 24); pertinentes para o momento.

**Tabela 24: Relação entre Absorção de água e Índice de vazios com a qualidade do concreto.**

Qualidade do Concreto	Absorção		Índice de vazios
	CEB	Helene	Andrade Perdrix
Boa	< 3 %	< 4,2 %	< 10 %
Média	3 a 5 %	4,2 a 6,3 %	10 a 15 %
Pobre	> 5 %	> 6,3 %	> 15 %

Fontes: CEB (1998)<sup>37</sup> e Helene (1983)<sup>38</sup> apud Silva (2006); Andrade Perdrix (1992).

O ensaio de absorção foi realizado na idade de 28 dias de cura do concreto, com temperatura de secagem de 105 +/- 5 °C, conforme recomenda a ABNT NBR 9778:2005. Na Figura 72 mostram-se os resultados.

**Figura 72: Absorção de água por imersão com tempo de secagem de 72 horas a 105 °C.**

Nota-se absorção de água inferior nos traços com dopagem, independente do agregado utilizado. Esta diminuição é mais significativa para os traços confeccionados com laterita, que tiveram os valores reduzidos em até 25%. Todos os concretos lateríticos apresentaram absorção de água por imersão inferior a 4,2 %, podendo ser enquadrados na melhor classificação segundo o critério de Helene. Somente o concreto mais pobre, 1:7,5,

<sup>37</sup> CEB - COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. Bulletin 192: Diagnosis and Assessment of Concrete Structures: State of the Art Report. CEB: Lausanne/Switzerland, jan. 1998.

<sup>38</sup> HELENE, P. R. L. La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. Hormigón, AATH, Buenos Aires, n. 10, p. 25-35, 1983.

com seixo rolado (S-75) apresentou valores em torno de 5 %, estando no limite entre qualidade média e pobre do CEB<sup>38</sup> e na classificação de qualidade média de Helene<sup>39</sup>.

Os concretos de alto consumo de cimento possuem valores de absorção inferiores aos de consumo menor, o que deve ser em virtude da maior porosidade da pasta dos concretos mais pobres. À exemplo, o concreto de 480 kg/m<sup>3</sup> com seixo rolado (S-35) tem relação água/aglomerantes em torno de 0,40 enquanto que o de 260 kg/m<sup>3</sup> (S-75) tem relação a/agl em torno de 0,65. É interessante observar que o concreto laterítico 1:6,5 (L-65), apesar de ter relação a/agl nesta mesma faixa de 0,40 e consumo de cimento 40% menor que o do S-35, apresentou desempenho superior à este, o que mostra o ganho que se obtém graças ao melhor empacotamento dos agregados (caminhos de percolação mais longos e tortuosos) e ao efeito de dispersão das partículas (refinamento dos poros).

Conclusões semelhantes são obtidas ao analisar o índice de vazios (Figura 73). Comparando com o critério de Andrade Perdrix (1992) pode-se dizer que os concretos lateríticos são de boa qualidade, estando sensivelmente abaixo do limite de 10 %, e que os com seixo rolado são classificados como sendo de média qualidade (no intervalo de 10 a 15 %).

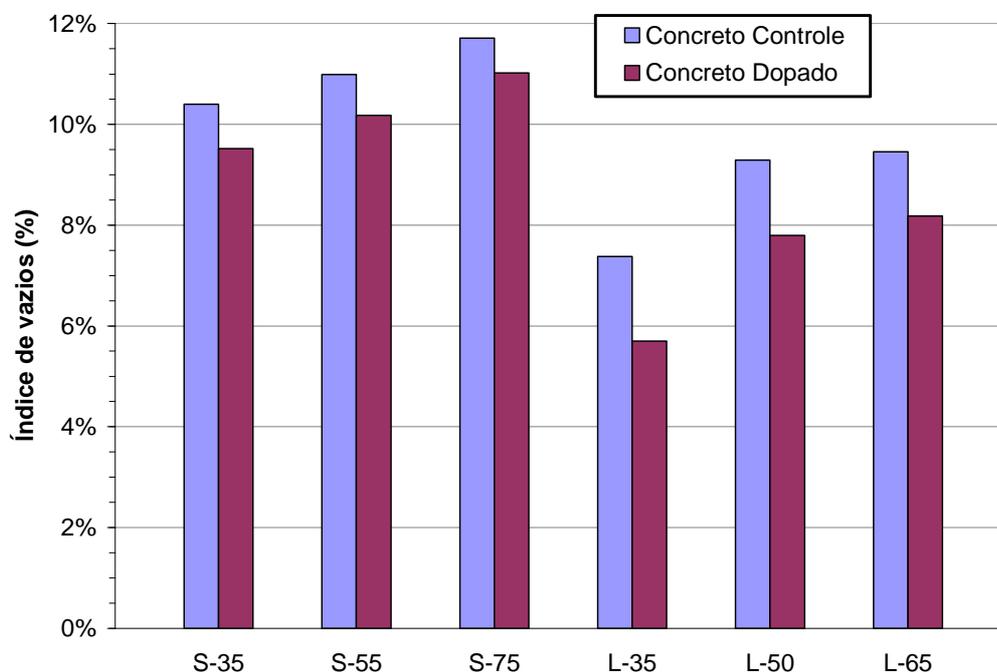


Figura 73: Índice de vazios por imersão com tempo de secagem de 72 horas a 105 °C.

## 5.7. Avaliação das propriedades microestruturais

O estudo microestrutural foi realizado tanto em amostras fraturadas quanto em polidas de concreto, sendo utilizados como sinais os elétrons secundários (SE) e retroespalhados (BSE), respectivamente. Os sinais referentes aos elétrons secundários oferecem melhor visão da morfologia da amostra e os retroespalhados permitem a visualização das fases hidratadas. As informações sobre a composição química da amostra em um ponto foram obtidas utilizando-se o espectrômetro de dispersão de energia (EDS), que permitiu análises qualitativas e semiquantitativas da composição dos elementos presentes.

Além de informações sobre a composição química em um ponto, o EDS permitiu análises segundo uma dada direção da amostra e/ou a geração de imagens de raios-X de múltiplos elementos (“dot mapping” - imagens de ponto), bem como o mapeamento quantitativo.

As análises por EDS de alguns pontos foram feitas para auxiliar na identificação dos produtos hidratados e também permitir que as relações Ca/Si, Al/Ca e Ca/(Si+Al) fossem estabelecidas. Estas relações são apresentadas ao lado das figuras, as quais contêm as correspondentes imagens com a localização dos pontos analisados.

A legenda de todas as micrografias apresenta a tensão de aceleração (EHT), a distância de trabalho (WD), a magnificação (Mag), o tipo de detector (SE ou BSE) e a escala (unidade em  $\mu\text{m}$ ). O valor da magnificação é dado com relação à tela do computador durante a obtenção da imagem, portanto a análise das micrografias deve ser realizada utilizando a escala apresentada na figura.

Considerando o objetivo do estudo e a grande quantidade de informações contida no banco de dados do grupo LMABC, referente às análises microscópicas de concretos com e sem sílica ativa de ferro-silício, optou-se por analisar em detalhe as interfaces pasta/agregado dos concretos controle (C) e dopado (D) e as carapaças que envolvem os agregados destes concretos, além da morfologia do CH e do C-S-H e hidratação da pasta de cimento Portland.

A intenção de realizar as micrografias na interface pasta/agregado e nas carapaças foi mostrar o efeito da técnica de dopagem nestas regiões. A identificação das fases presentes em cada amostra de concreto polida e as alterações na morfologia dos produtos hidratados, principalmente do CH e do C-S-H, também auxiliou no cumprimento do objetivo. Desta forma, várias imagens de cada amostra foram selecionadas.

Apresenta-se na seqüência uma série de micrografias (Figuras 74 a 152), acompanhadas de comentários, que destacam os aspectos de importância e de interesse em cada imagem. Todas as micrografias foram obtidas de amostras com 28 dias de cura. As Figuras 74 a 115 referem-se às micrografias dos traços de concreto controle e dopado confeccionados com laterita e as Figuras 116 a 152 reportam-se às micrografias de traços controle e dopado elaborados com seixo rolado. Devido à grande quantidade de imagens obtidas, serão apresentados separadamente os resultados microscópicos referentes à laterita e os referentes ao seixo rolado.

### 5.7.1. Resultados microestruturais dos concretos lateríticos

A análise microscópica das misturas lateríticas se iniciou com o estudo da camada de dopagem, sendo avaliada a carapaça que envolve a laterita. As camadas de dopagem (calda de alto desempenho e solução de água e sílica ativa) foram analisadas com auxílio de microscópio digital MIC-D Olympus, possibilitando aumento de 24 a 255 vezes. Neste estudo prévio foram visualizadas a existência de aderência física por ligação mecânica entre o agregado e a pasta, a espessura da camada de dopagem (no caso da calda de alto desempenho) e a capacidade de impregnação da sílica ativa à laterita (no caso da solução de água e sílica ativa).

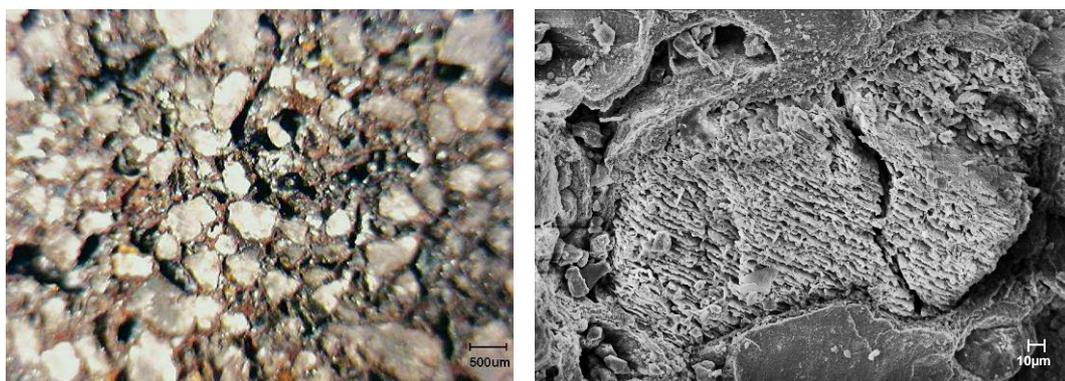
Na Figura 74 está a primeira amostra polida avaliada com laterita. O agregado impregnado com calda de alto desempenho foi inserido em pasta de composição idêntica ao do traço de concreto 1:5,5 somente para facilitar a compreensão dos resultados, dada a ausência de agregados miúdos.



**Figura 74: Amostra polida de laterita dopada com calda e inserida em pasta de cimento (à esq.) e seu respectivo aumento de 24x (à dir.).**

A calda de alto desempenho aderida à laterita corresponde à camada mais escura observada na Figura 74. Ao aumentar a magnificação da amostra é possível ver que a forma original da laterita é alterada com a camada de impregnação e que a espessura desta camada varia ao longo do contorno do agregado, chegando a ultrapassar 500µm em alguns locais. Com esta magnificação de 24 vezes já é possível ver que existe continuidade entre a camada de impregnação e a laterita, já que não foram observadas falhas nesta interface, representando ocorrência de boa aderência mecânica da laterita com a camada de dopagem. Isto mostra que o procedimento de dopagem adotado neste estudo está adequado.

Pode-se dizer que a técnica de dopagem, nesta primeira análise simplista, porém importante, cumpre duas de suas premissas: a de alterar a forma do agregado e a de proporcionar o reforço onde houver necessidade. A calda de alto desempenho não conseguiu atingir o interior da laterita, tornando impossível o reforço interno do agregado, conforme visto na Figura 75. A confirmação disto virá das imagens obtidas com MEV.



**Figura 75: Interior poroso da laterita: ausência de calda de impregnação (à esq. 24x e à dir. 1000x).**

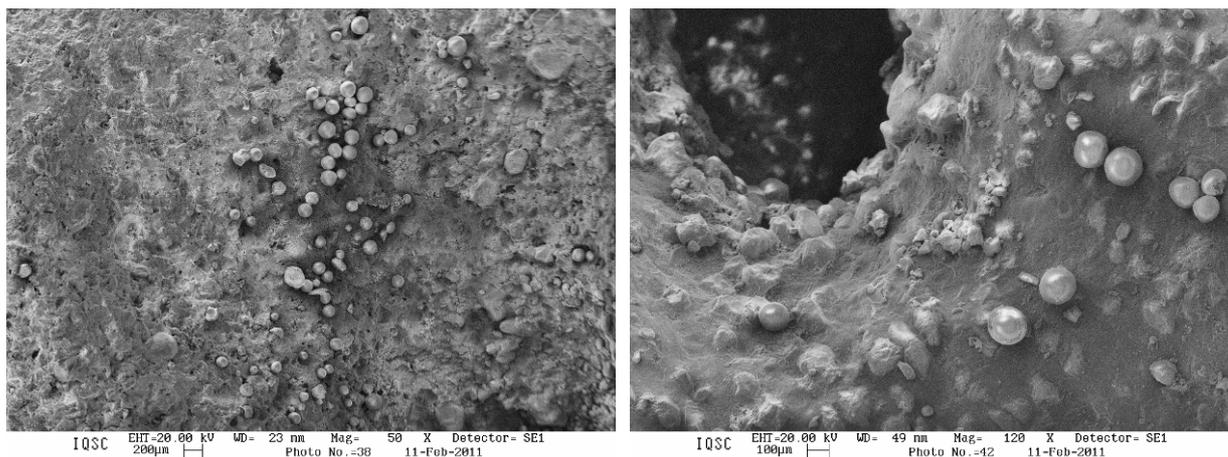
A primeira avaliação microestrutural da dopagem com solução de água e sílica ativa foi feita comparando-se algumas partículas de laterita sem e com impregnação. O objetivo foi verificar se houve penetração da sílica ativa nas reentrâncias da laterita e se a adição estava realmente defloculada, conforme previsto durante o procedimento de mistura da solução. Analisando a Figura 76 observa-se que partículas de sílica estão por toda a superfície da laterita, mas as maiores quantidades se depositam nas proximidades dos vazios deste agregado. Os limites de magnificação e resolução do microscópio digital impediram a visualização de partículas de sílica no interior dos vazios da laterita.



**Figura 76: Comparação de partículas de laterita sem (linha superior) e com (linha inferior) impregnação de solução de água e sílica ativa.**

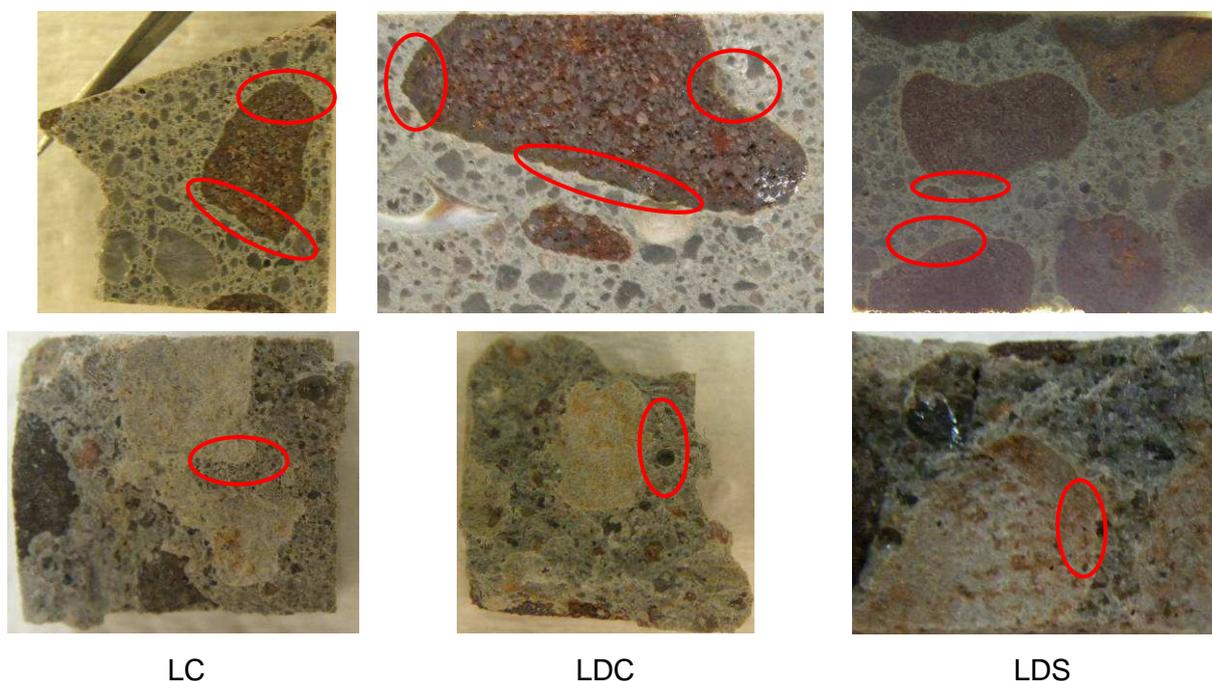
As imagens também indicam que boa parte da sílica ativa permaneceu aglomerada, já que algumas partículas apresentam diâmetro de quase  $250\mu\text{m}$ , podendo ser esta uma das causas de comprometimento do desempenho mecânico do concreto LDS. Portanto, pode-se dizer que a mistura da solução de água e sílica não foi adequada, havendo a necessidade de maior energia de cisalhamento para a desaglomeração da adição. Outro aspecto que favoreceu a presença dos aglomerados de sílica foi a restrição quanto à mistura da laterita à solução. A baixa resistência da laterita impediu que se aplicasse energia de dispersão ao sistema, contribuindo na permanência dos grumos já formados. Apesar disso, as amostras de concreto LDS foram avaliadas com MEV.

Para descartar qualquer dúvida quanto à escala apresentada nas imagens anteriores, a mesma partícula de laterita que foi dopada com a solução de água e sílica ativa e analisada no microscópio digital foi avaliada com a microscopia eletrônica de varredura. Conforme imagens apresentadas na Figura 77, nota-se coerência entre as escalas de magnificação.



**Figura 77: Partícula de laterita dopada com solução de água e sílica, observada em MEV.**

A Figura 78 é referente às amostras, polidas e fraturadas, dos concretos lateríticos LC, LDC e LDS, escolhidas para análise, sendo destacadas as áreas de interesse. A Figura 79, Figura 80 e Figura 81 correspondem às amostras, polidas e fraturadas, escolhidas para análise dos concretos lateríticos complementares.



**Figura 78: Amostras de concreto laterítico LC, LDC e LDS selecionadas para MEV.**

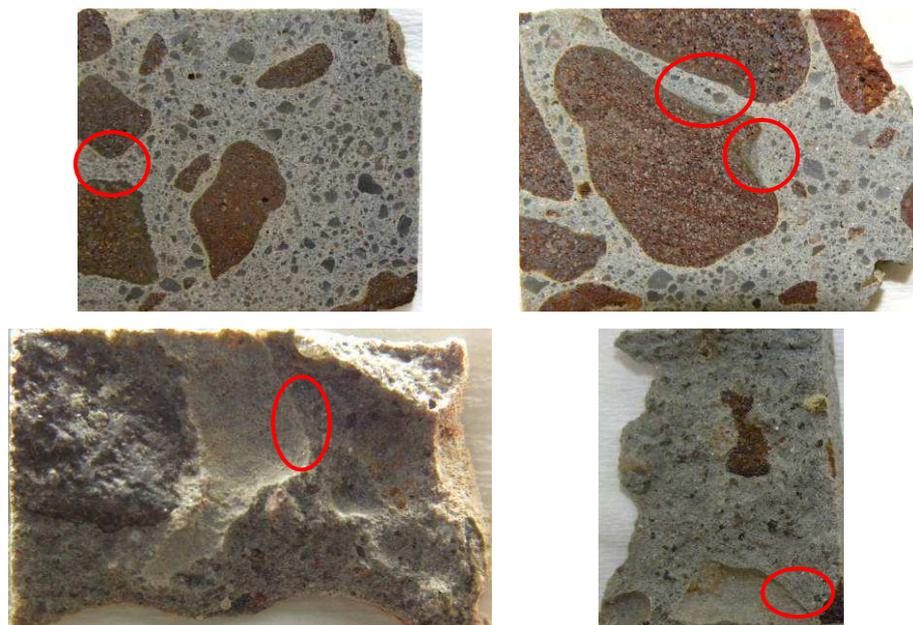


Figura 79: Amostras de concreto laterítico complementar LC-Comp1 (à esq.) e LD-Comp1 (à dir.) selecionadas para MEV.

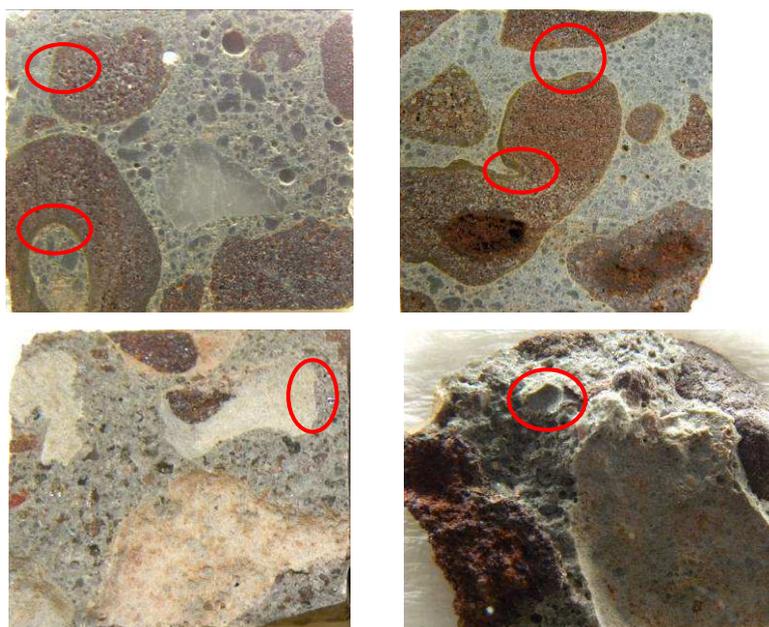
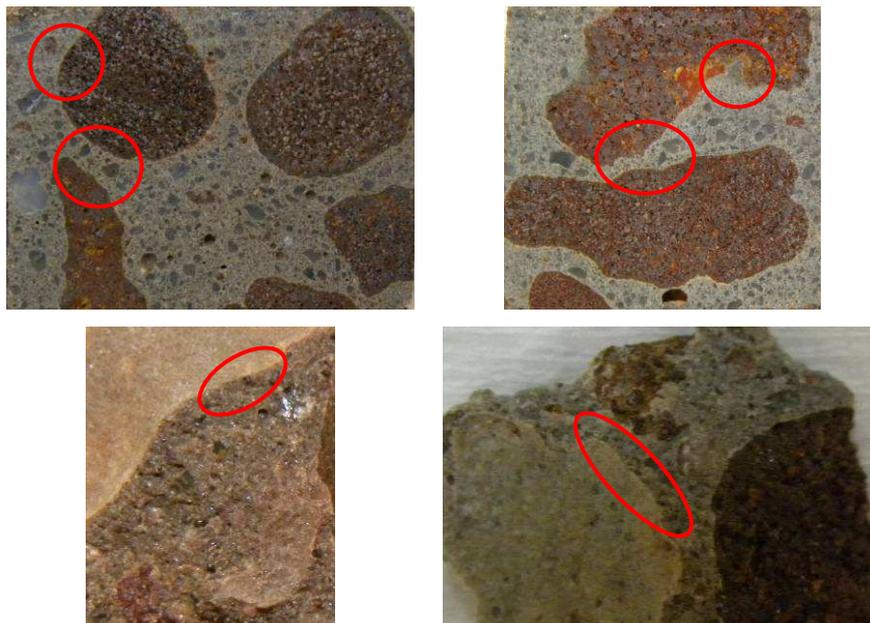


Figura 80: Amostras de concreto laterítico complementar LC-Comp2 (à esq.) e LD-Comp2 (à dir.) selecionadas para MEV.



**Figura 81: Amostras de concreto laterítico complementar LC-Comp3 (à esq.) e LD-Comp3 (à dir.) selecionadas para MEV.**

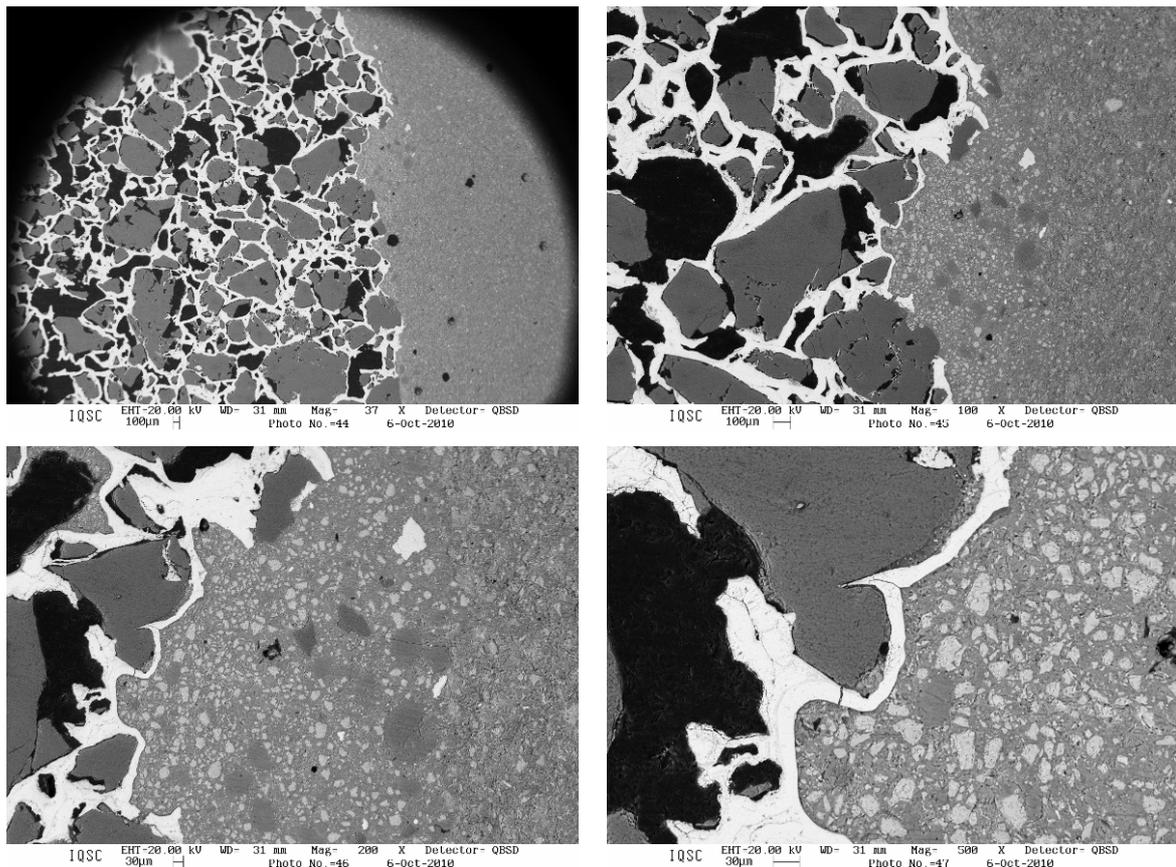
A seguir, apresenta-se o estudo com MEV realizado nos concretos lateríticos estudados.

A Figura 82 e Figura 83 referem-se às micrografias de laterita dopada com calda de alto desempenho e inserida em pasta de cimento, obtidas em uma primeira análise. Embora este tenha sido o estudo microscópico inicial da técnica de dopagem nas lateritas, foi possível observar aspectos importantes da dopagem neste agregado, como por exemplo, a dificuldade de penetração da calda de impregnação para o interior da laterita, a variação da espessura desta calda ao longo da superfície do agregado e suas características particulares quanto aos produtos de hidratação.

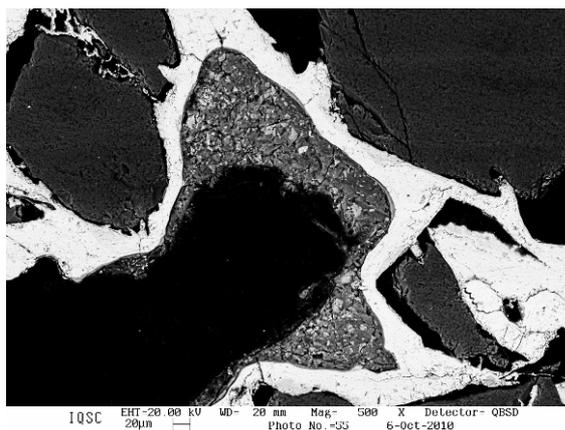
As micrografias da superfície da laterita apresentadas na Figura 82 mostram detalhes de sua porosidade. A marcante presença de poros na estrutura deste agregado justifica os altos valores de absorção. Também se observa que estes poros se interiorizam na laterita gerando vazios não conectados, que além de causarem variação de massa específica em função do diâmetro do agregado, diminuem a resistência mecânica do material.

O fato de a laterita apresentar porosidade fechada, sem existir conectividade entre seus vazios, faz com que a técnica de dopagem não consiga reforçá-lo internamente. Então, a calda de impregnação passa a atuar na melhoria das características superficiais deste agregado, assim como ocorre para o seixo rolado.

Em todas as amostras de concreto laterítico estudadas em MEV não se observou calda de impregnação no interior da laterita, confirmando o observado em microscópio digital. Somente em uma das amostras avaliadas foi que isto não ocorreu (Figura 83). No entanto, acredita-se que, o que aparentemente é um poro talvez seja apenas uma reentrância do agregado, devido ao efeito 3D (um poro em uma seção 2D pode simplesmente ser uma reentrância no grão 3D).



**Figura 82: Micrografias (37x até 500x) da amostra polida de laterita dopada com calda.**



**Figura 83: Micrografia (500x) detalhando a calda de impregnação no interior da laterita.**

Diante disso, os poros internos da laterita não foram preenchidos. A entrada da calda no interior da laterita pode ter sido dificultada pela própria dimensão dos grãos de cimentos. Os poros abertos da laterita, com diâmetros que podem atingir 100  $\mu\text{m}$ , podem ser perfeitamente preenchidos pelos grãos de cimento, entretanto à medida que o tamanho dos poros da laterita diminui<sup>39</sup>, há um intertravamento dos grãos, impedindo a entrada da pasta no interior do agregado.

Uma possível solução para essa problemática, e muito interessante, é o uso de cimento com alta reatividade. Por este cimento possuir partículas de menor diâmetro, as quais percolam mais facilmente para o interior da cavidade e também reagem mais rapidamente, representando diminuição na quantidade de cimento anidro dentro da cavidade, o reforço interno do agregado é facilitado.

Outra solução, e que a princípio pode parecer ousada ou até mesmo inviável, é o uso de uma câmara de vácuo que promova a dopagem do agregado sem interferência do ar ou resistência a este. A penetração se daria no momento em que se restaura a pressão atmosférica, tendo que o agregado estar imerso na calda, ou pelo menos ter uma camada de calda suficientemente grossa recobrimo-o. Assim, a pressão atmosférica ‘empurraria’ a impregnação para dentro dos poros. A câmara de vácuo pode ser construída, por exemplo, em perfis de aço reforçado, com dimensão cúbica de 2 metros. Com auxílio de um motor e de uma mangueira conectados a ela, pode ser feita a retirada do ar do agregado em questão e logo em seguida, a inserção da pasta de impregnação, que penetraria com auxílio do próprio vácuo, realizando desta forma, a dopagem do material. Com estas dimensões de caixa e de posse do motor torna-se fácil, e por que não viável, a dopagem de materiais em locais problemáticos.

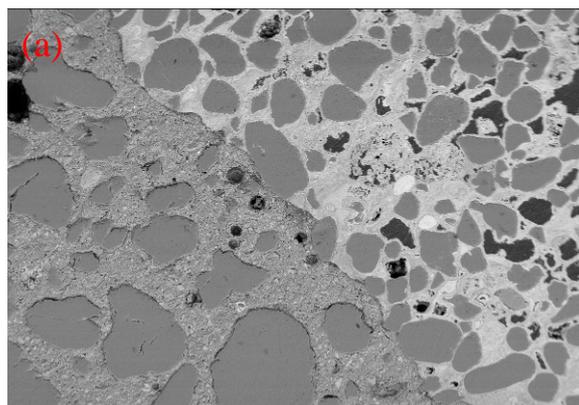
<sup>39</sup> O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (Figura 64) indicou diâmetro médio do poro interno da laterita igual a 1,20  $\mu\text{m}$ , sendo que 80% dos poros estão entre 13,46 e 0,07  $\mu\text{m}$ .

A partir das micrografias da Figura 82 pode-se observar que a espessura da camada de dopagem varia conforme a conformação superficial da laterita, sendo mais espessa em regiões de maior reentrância do agregado. A camada de impregnação pode ser facilmente reconhecida nestas micrografias, dados os aspectos particulares desta camada: apresenta alta concentração de pontos de coloração clara (branca) que representam partículas anidras de cimento e alta compactidade.

Quando se utilizam relações a/c inferiores a 0,43, nem todo o cimento anidro hidrata, permanecendo como material de enchimento na matriz e aumentando sua compactidade. O uso de superplastificante, com redução da relação a/agl produz uma diminuição na distância entre as partículas de cimento, o que resulta em uma matriz mais compacta. Aïtcin (2000) e Neville (1997) consideram que uma porção significativa das partículas de cimento permanece sem se hidratar e que, em termos gerais, a resistência do concreto é dependente do total de vazios contidos no concreto, em se considerando que as relações de aderência e coesão entre as partículas são suficientemente fortes. O grau de hidratação do cimento, como tal, não é tão importante e, ainda que não seja este o seu objetivo, essas partículas de cimento não hidratadas tornam-se agregados.

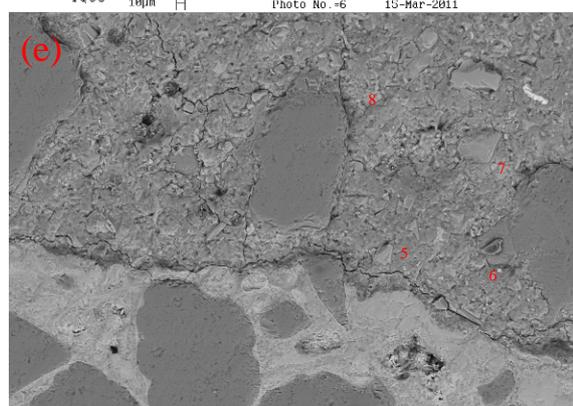
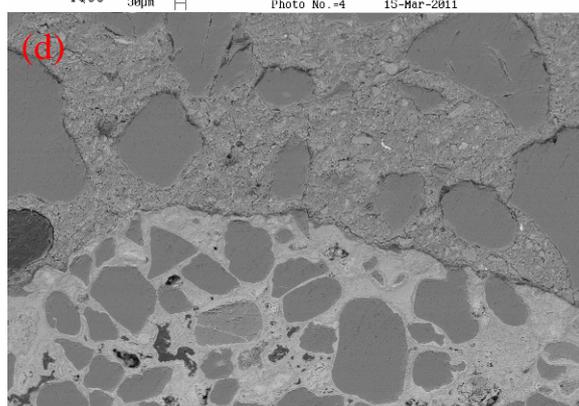
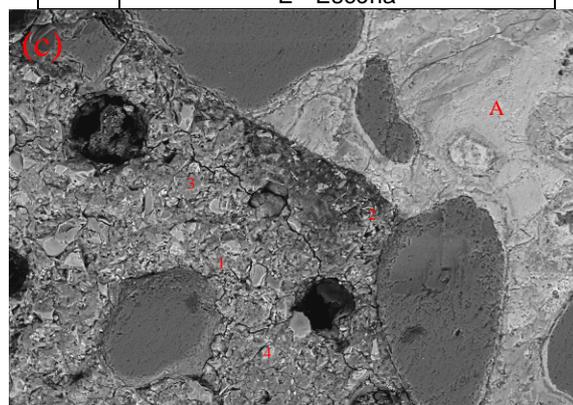
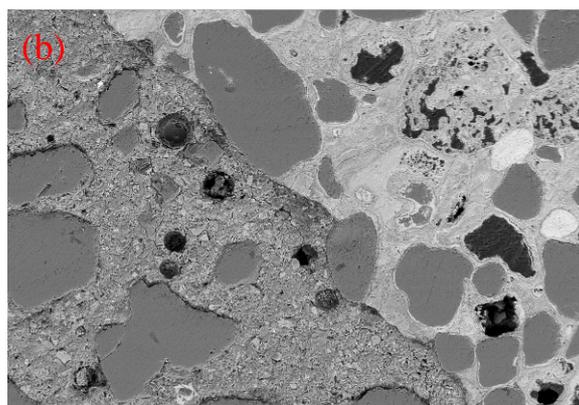
Outra característica marcante da calda de alto desempenho é sua compactidade, atribuída ao uso da sílica ativa e, principalmente, do aditivo superplastificante (função de dispersão do sistema). Com a associação dessas duas adições há redução da porosidade. A influência da sílica ativa na microestrutura de todas as matrizes de cimento resulta num aumento no volume de poros gel e diminuição no volume de poros capilares, ou seja, num acentuado refinamento dos poros, além da redução na porosidade total (MELO, 2000).

As Figuras 84 a 115 referem-se às micrografias dos traços controle e dopado de cada traço de concreto estudado. A fim de facilitar a comparação dos resultados dos concretos lateríticos, são apresentadas a seguir, e seqüencialmente, as micrografias das amostras controle e dopada. Inicialmente serão vistas as micrografias obtidas de amostras polidas de concreto e na seqüência as obtidas de amostras fraturadas.

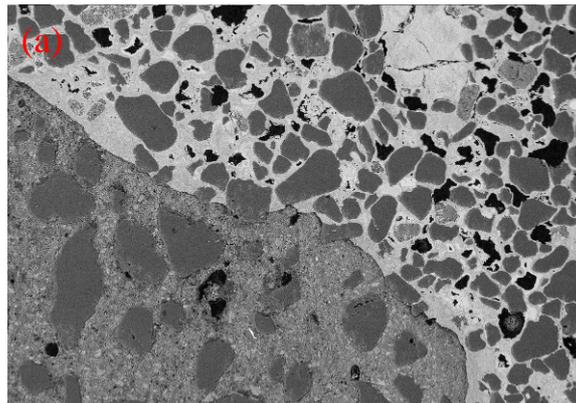


Relações das fases presentes nas Micrografias (c) e (e) da Figura 84- Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	CH	35,08	-	35,08
2	E	1,40	0,27	1,08
3	C-S-H	1,78	0,15	1,48
4	A	3,23	0,04	2,95
5	C-S-H	1,61	0,08	1,45
6	E	1,06	0,28	0,82
7	A	2,15	0,03	2,07
8	CH	38,34	-	38,34
obs.:	A - Anidro			
	CH - Ca(OH) <sub>2</sub>			
	C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado			
	E - Escória			



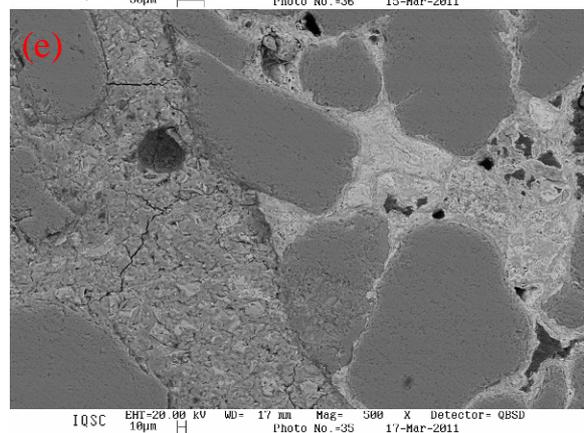
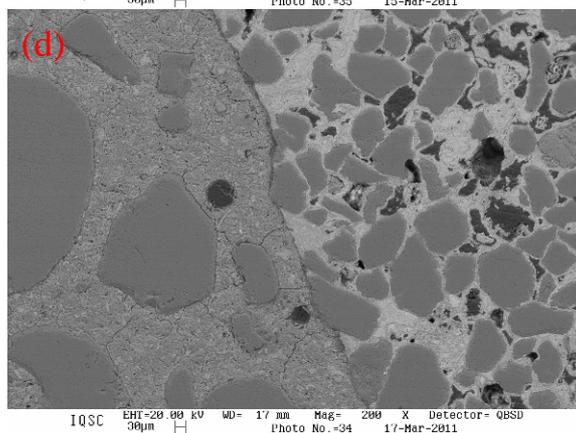
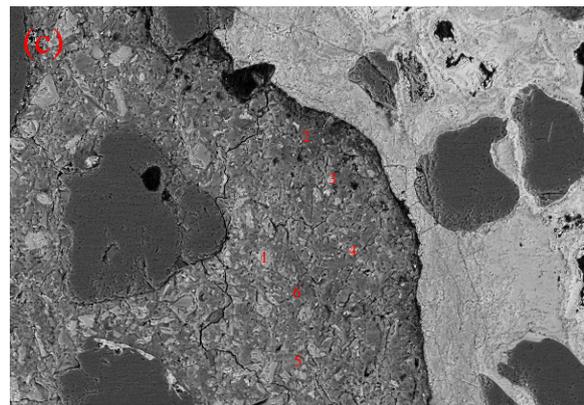
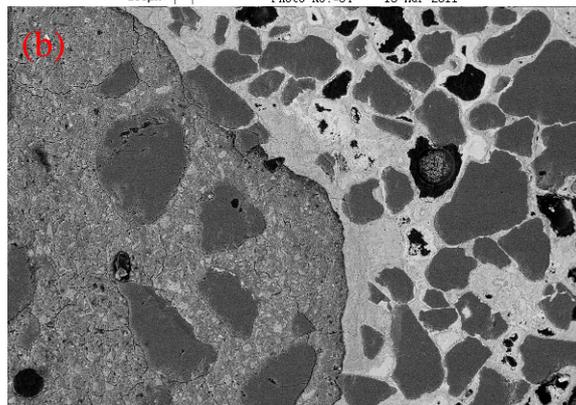
**Figura 84: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC. (a), (b) e (c): ZT abaixo do agregado; (d) e (e): ZT acima do agregado.**



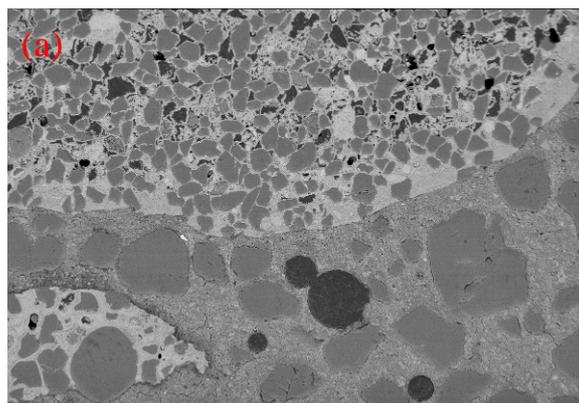
Relações das fases presentes na Micrografia (c) da Figura 85 - Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	A	2,32	0,03	2,24
2	C-S-H	1,35	0,24	1,01
3	E	1,39	0,30	0,99
4	AFm	4,47	0,43	1,76
5	CH	13,10	-	13,10
6	C-S-H	1,80	0,08	1,68

Obs: AFm - monossulfoaluminato

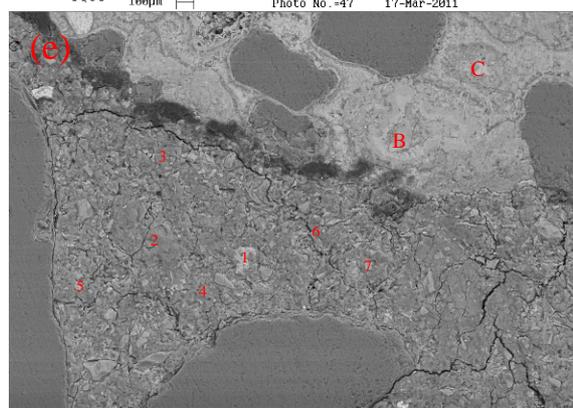
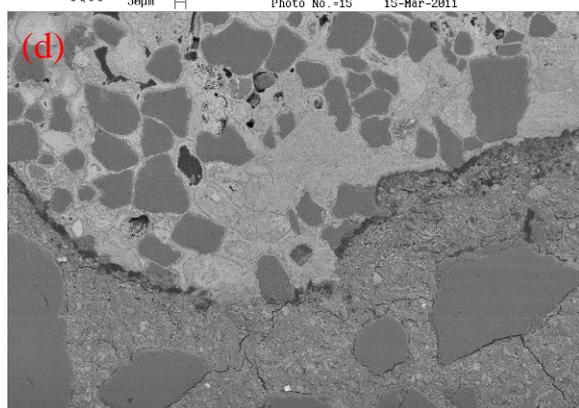
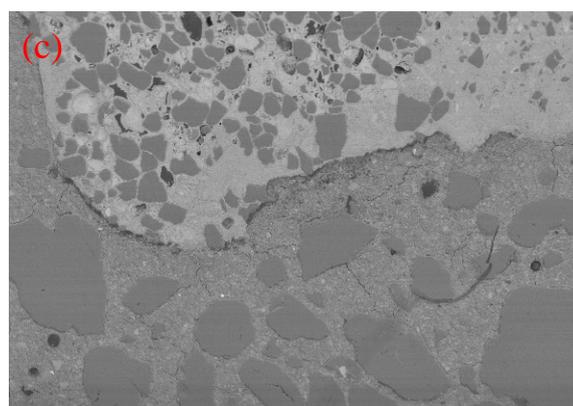
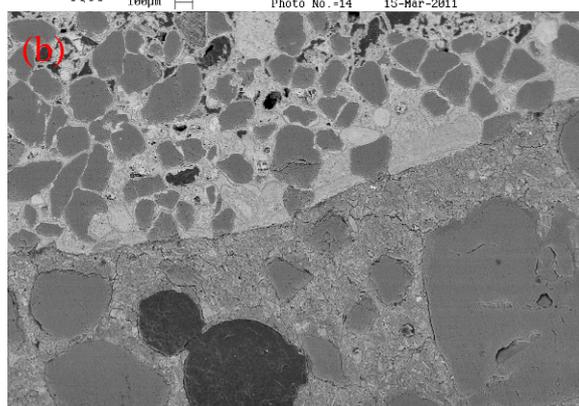


**Figura 85: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LDC. (a), (b) e (c): ZT acima do agregado; (d) e (e): ZT abaixo do agregado.**



Relações das fases presentes na Micrografia (e) da Figura 86 - Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	A	3,06	0,04	2,80
2	C-S-H	1,90	0,14	1,58
3	C-S-H	1,33	0,15	1,15
4	CH	35,26	-	35,26
5	A	1,36	0,27	1,00
6	C-S-H	1,62	0,14	1,33
7	E	1,30	0,29	0,96



**Figura 86: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LDS. (a) e (b): ZT acima do agregado; (d), (e) e (f): ZT abaixo do agregado.**

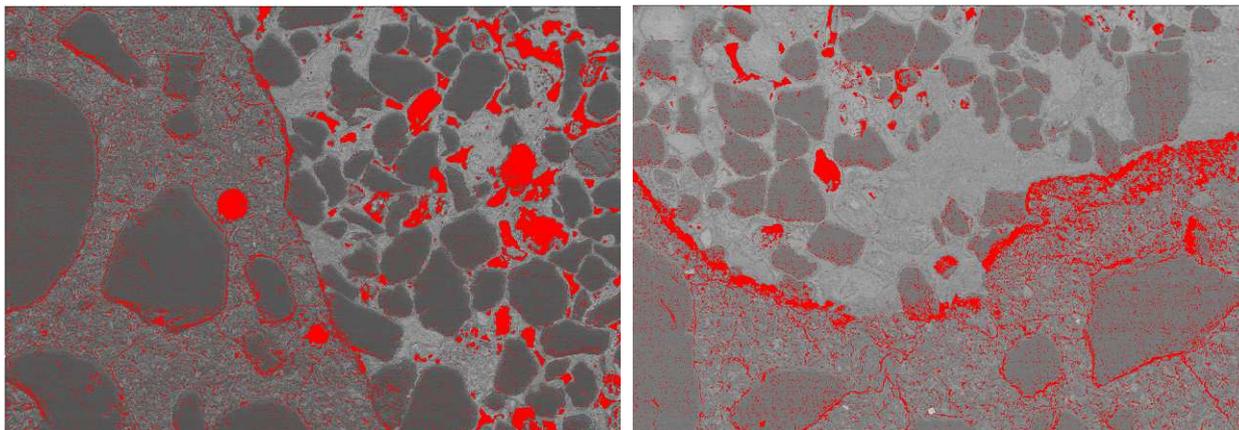
As composições dos pontos A, B e C localizados no interior da laterita e indicados na micrografia (c) da Figura 84 e na micrografia (e) da Figura 86 são mostradas na Tabela 25. Nota-se que a coloração cinza mais claro corresponde ao elemento mais pesado Fe e à medida que a coloração cinza escurece maior é a quantidade de elemento químico menos pesado, como o alumínio, por exemplo, presente na composição.

**Tabela 25: Composição química dos pontos A, B e C localizados no interior da laterita (Figura 84 e Figura 86).**

Elemento (n° atômico - %)	Ponto		
	A	B	C
O	55,52	54,35	48,67
Mg	-	-	0,73
Al	4,68	11,47	5,10
Si	1,86	6,13	6,07
Ca	0,48	0,88	0,54
Ti	-	0,63	4,02
Cr	1,22	-	0,64
Fe	36,24	26,54	34,24

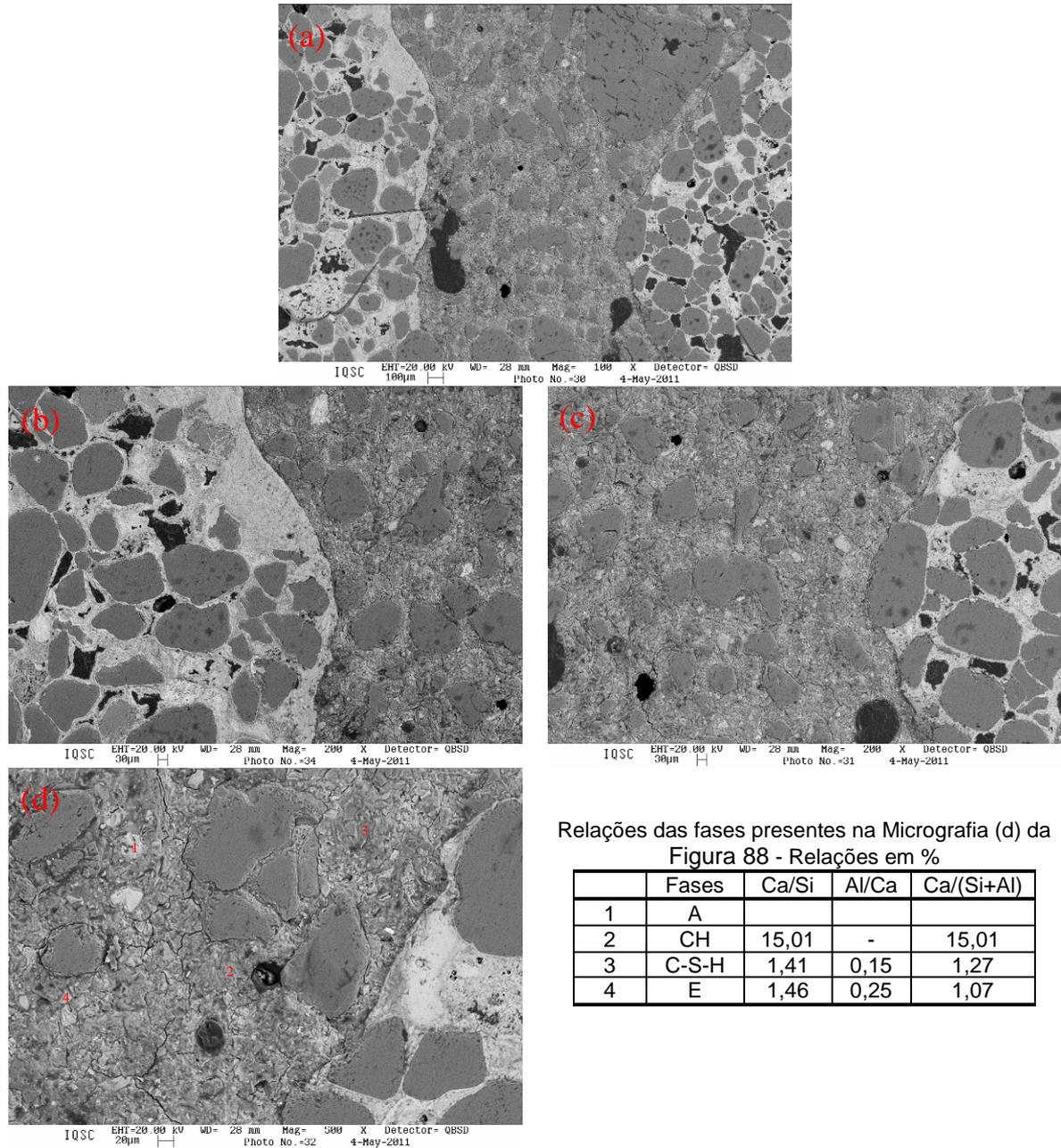
O conjunto de micrografias da Figura 84 ilustra a alta porosidade existente na zona de transição pasta/agregado dos concretos de referência LC, os quais foram elaborados sem a técnica de dopagem da laterita. A coloração preta representa os vazios existentes. Nos concretos lateríticos LCD nota-se grande redução dos vazios na zona de interface (micrografias da Figura 85), demonstrando a eficiência da técnica de dopagem com calda de alto desempenho no refinamento dos poros. Já para os concretos LDS (micrografias da Figura 86), confeccionados com agregados dopados em solução de água e sílica ativa, não se observa tal refinamento, dada a coloração escura existente entre a laterita e a pasta do concreto. Com base nesta análise microscópica e associando-a com os resultados mecânicos dos concretos LDC e LDS chegou-se a conclusão que a melhor forma de dopar o agregado foi impregná-lo com calda de alto desempenho, justificando o emprego deste procedimento em todos os demais concretos lateríticos elaborados.

Utilizando recursos de processamento de imagem, na Figura 87 estão destacadas na cor vermelha as áreas de poros dos concretos LDC e LDS, ficando claro que a quantidade de vazios na zona de interface pasta/agregado do concreto dopado com calda é bem menor que aquela apresentada pelo concreto dopado com solução de água e sílica ativa. Apesar de a sílica ser comprovadamente benéfica para misturas cimentícias devido aos efeitos fíler e pozolânico que contribuem com o refinamento dos poros, não houve permanência desta adição na superfície da laterita, conforme explicado na seção 5.6. (Avaliação das propriedades mecânicas), e a zona de transição que deveria ser melhorada não foi alterada.

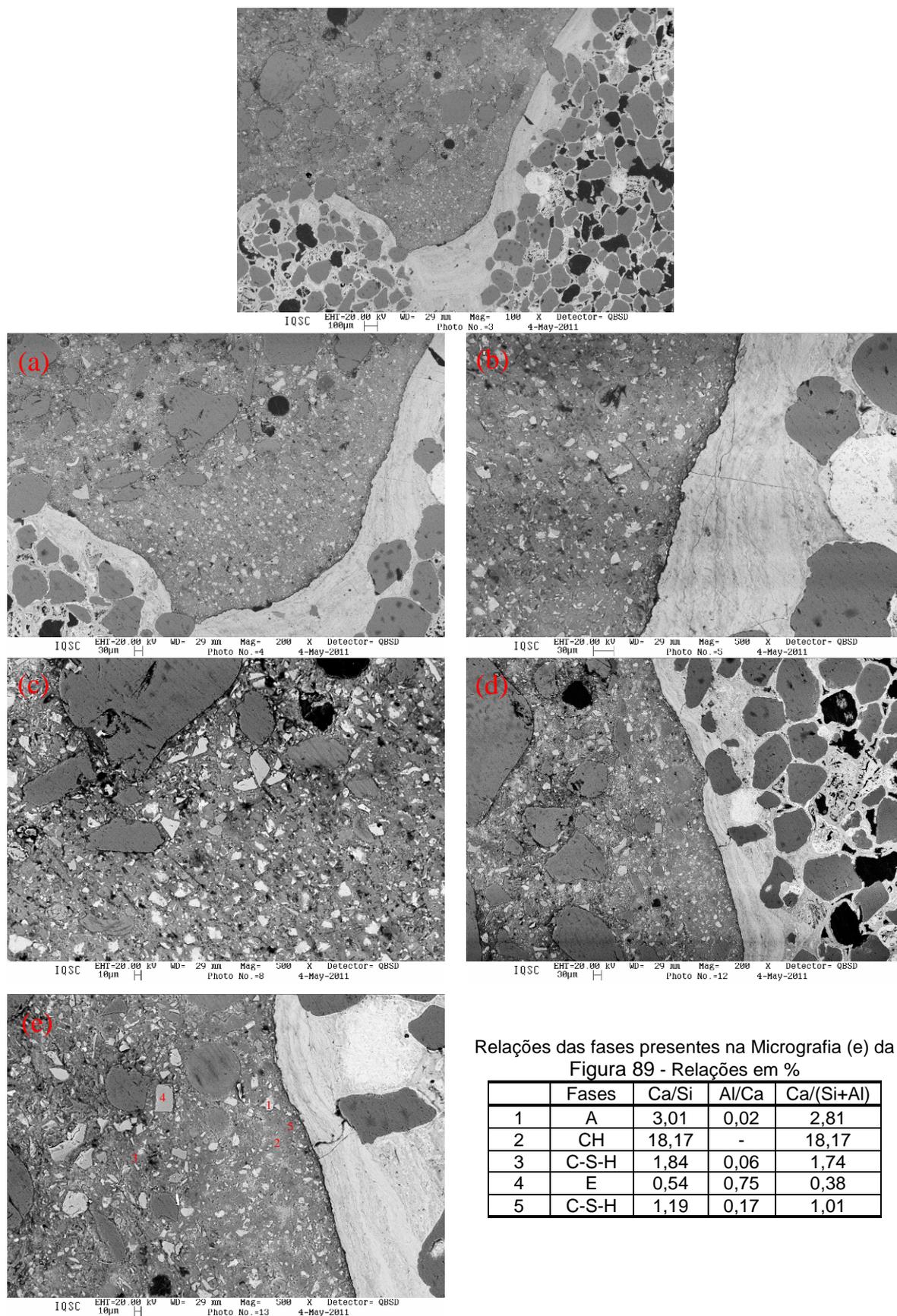


**Figura 87: Micrografias (200x) das amostras de LDC (esq.) e LDS (dir.) evidenciando poros.**

As micrografias mostradas a seguir foram obtidas dos concretos lateríticos complementares. O interesse em analisar microscopicamente estes concretos está na avaliação conjunta da técnica de dopagem com outras associadas à tecnologia do concreto, como o empacotamento de partículas e uso de aditivos e adições minerais. Com isso, foi possível verificar a contribuição da técnica de dopagem em concretos convencionais e de alto desempenho.



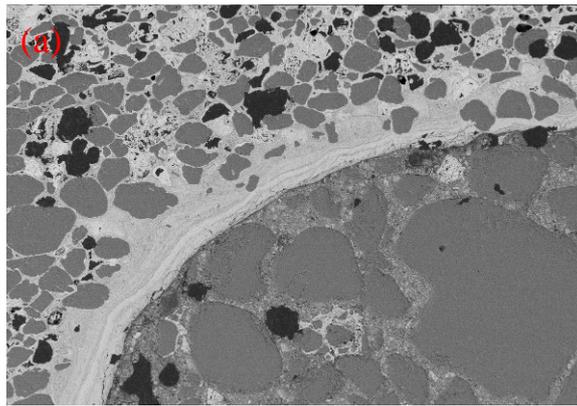
**Figura 88: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC-Comp1. (a) e (b): ZT abaixo do agregado; (c) e (d): ZT acima do agregado.**



Relações das fases presentes na Micrografia (e) da Figura 89 - Relações em %

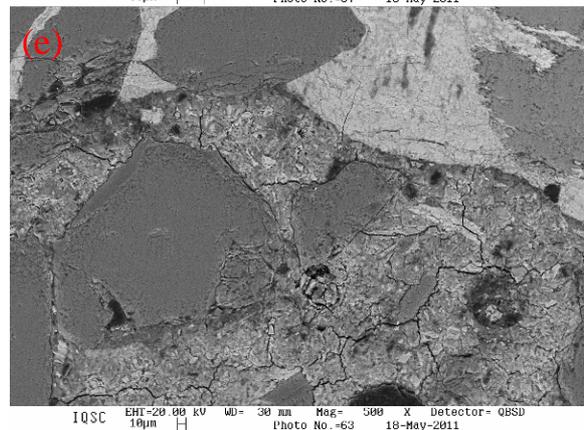
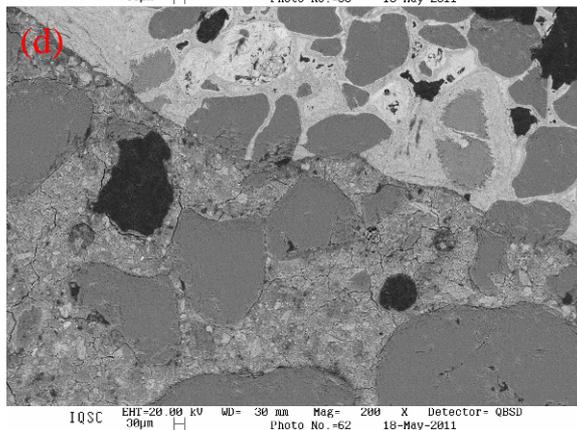
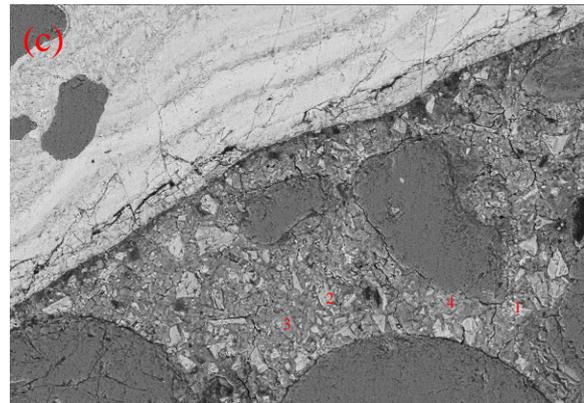
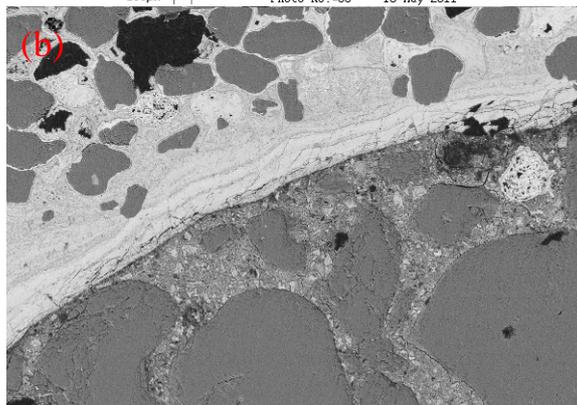
	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	A	3,01	0,02	2,81
2	CH	18,17	-	18,17
3	C-S-H	1,84	0,06	1,74
4	E	0,54	0,75	0,38
5	C-S-H	1,19	0,17	1,01

**Figura 89: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LD-Comp1. (a), (b) e (c): ZT na lateral do agregado; (d) e (e): ZT acima do agregado.**

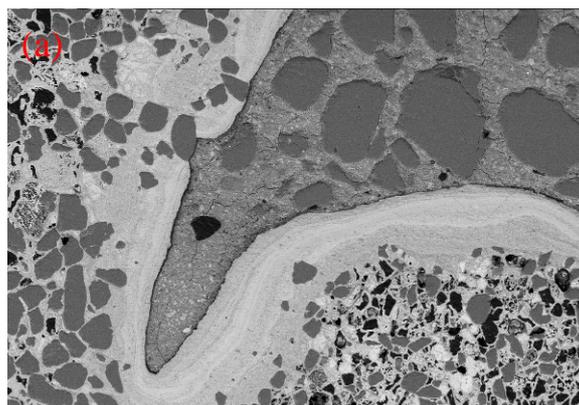


Relações das fases presentes na Micrografia (c) da Figura 90 - Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	AFm	5,06	0,49	1,59
2	E	1,44	0,24	1,07
3	C-S-H	1,53	0,07	1,42
4	CH	15,84	0,01	12,07

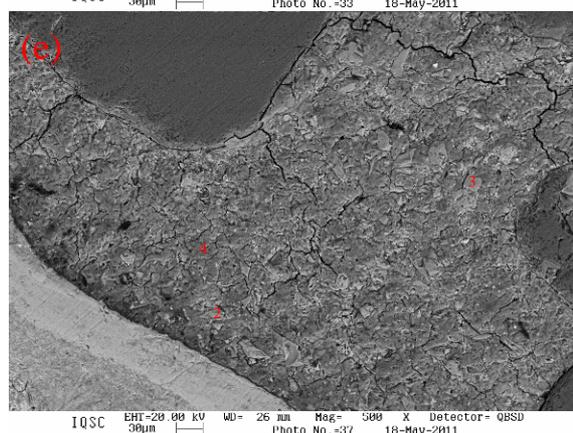
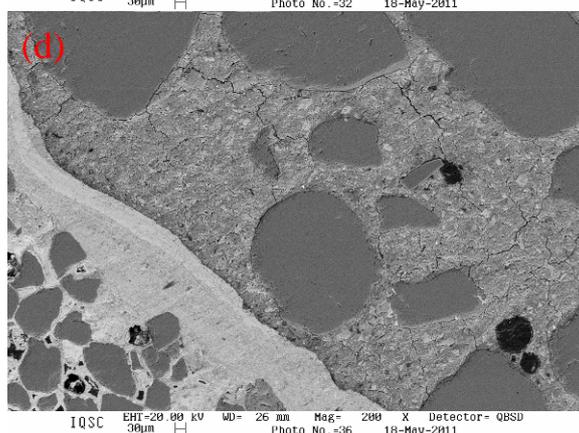
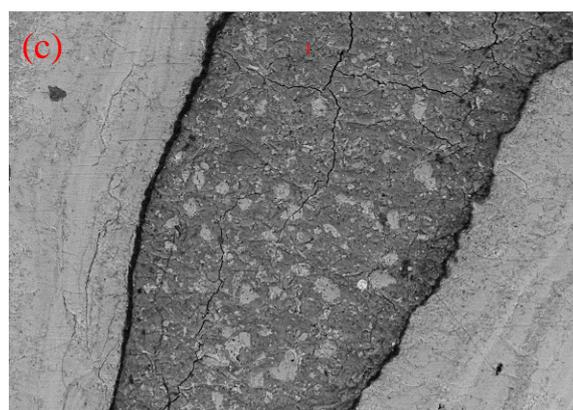
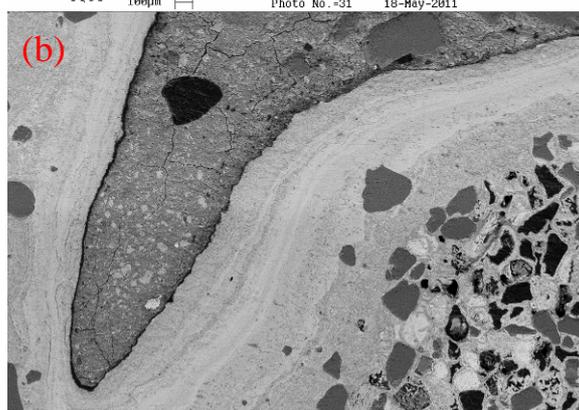


**Figura 90: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC-Comp2. (a), (b) e (c): ZT abaixo do agregado; (d) e (e): ZT acima do agregado.**

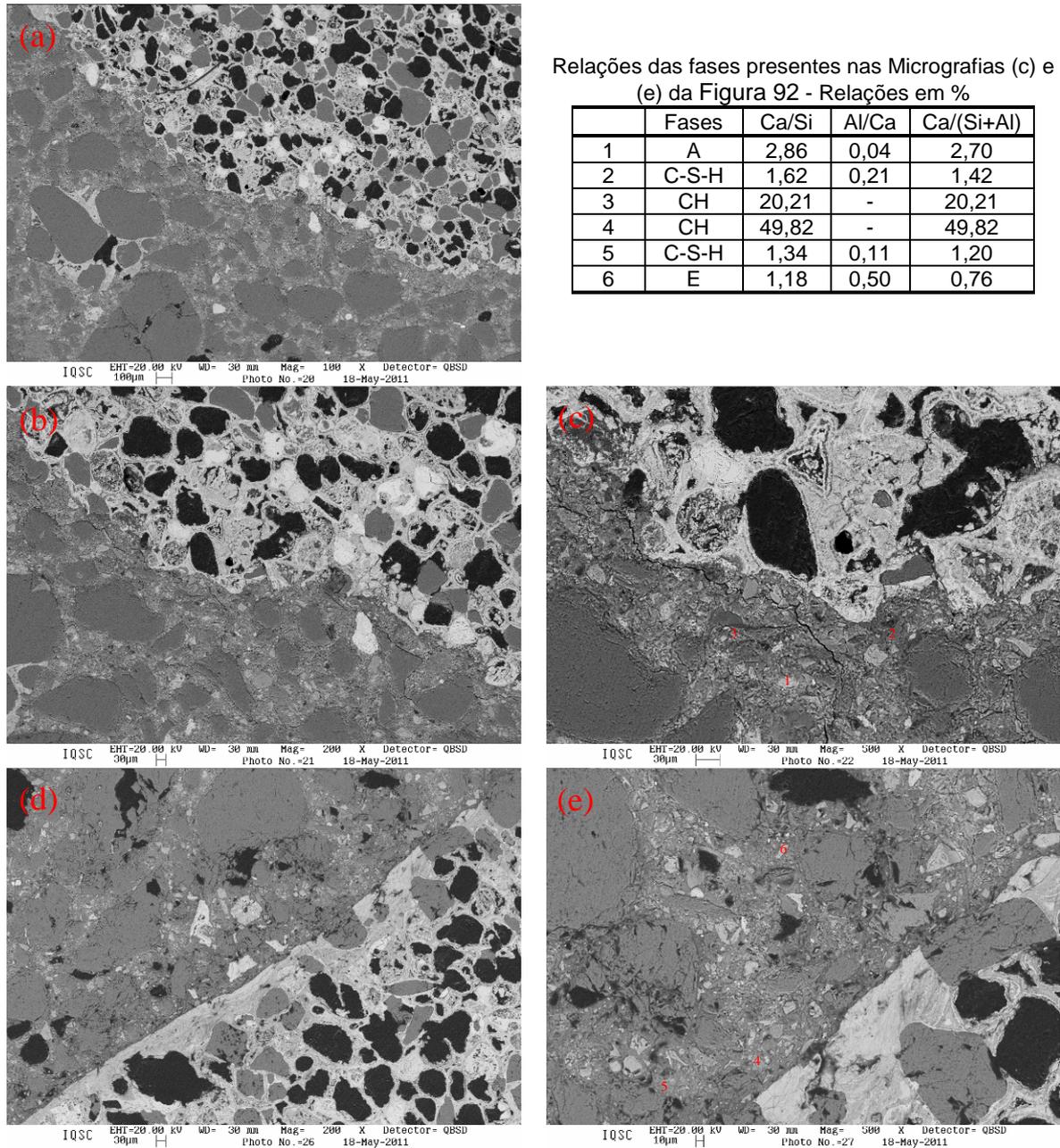


Relações das fases presentes nas Micrografias (c) e (e) da Figura 91 - Relações em %

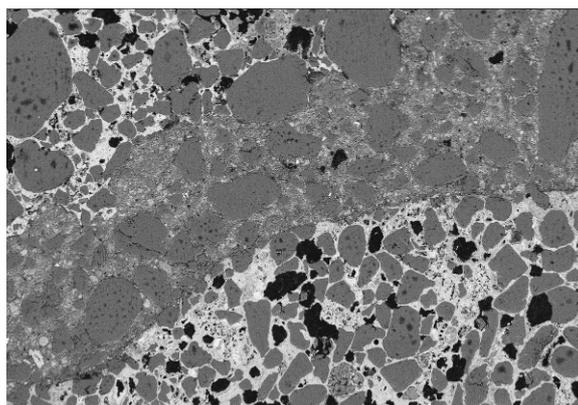
	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	2,48	0,04	2,29
2	CH	25,30	-	25,30
3	E	1,16	0,30	0,86
4	C-S-H	1,63	0,08	1,45



**Figura 91: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LD-Comp2. (a), (b) e (c): ZT abaixo do agregado; (d), (e) e (f): ZT acima do agregado.**

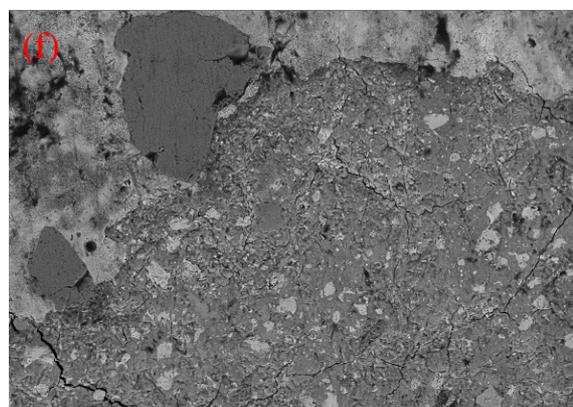
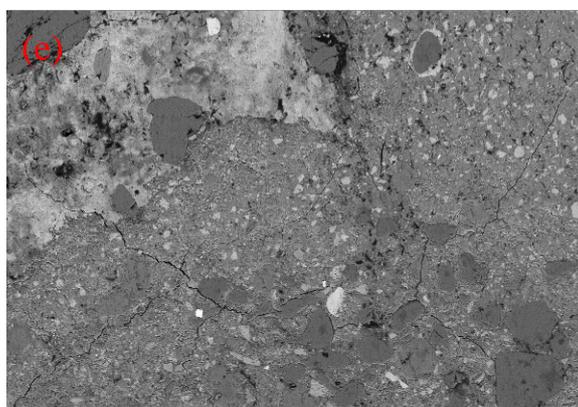
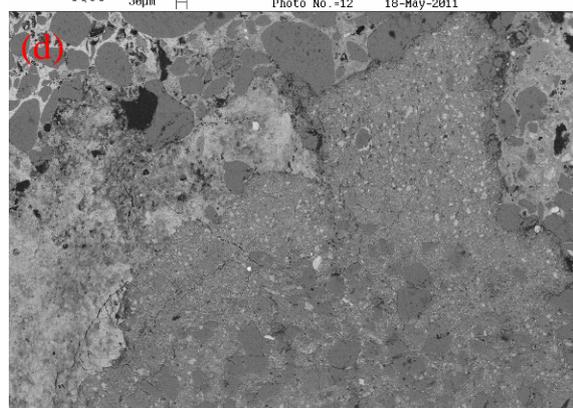
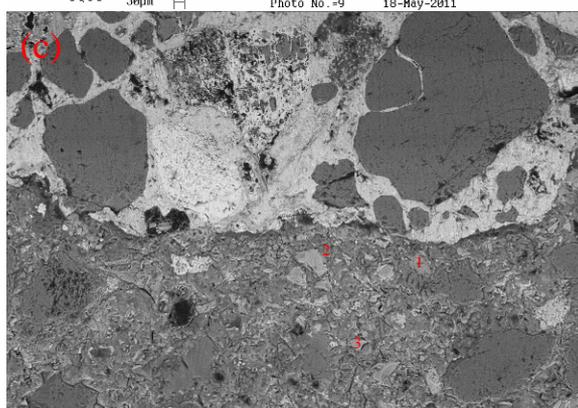
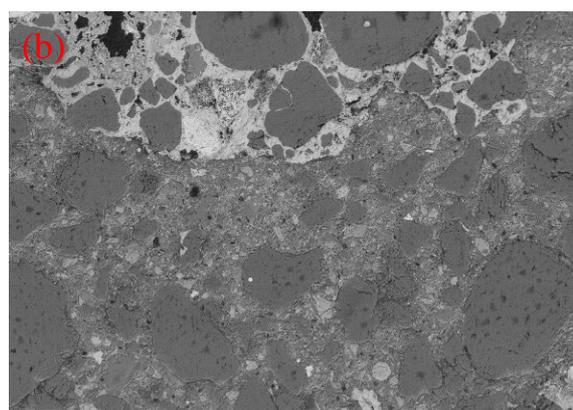
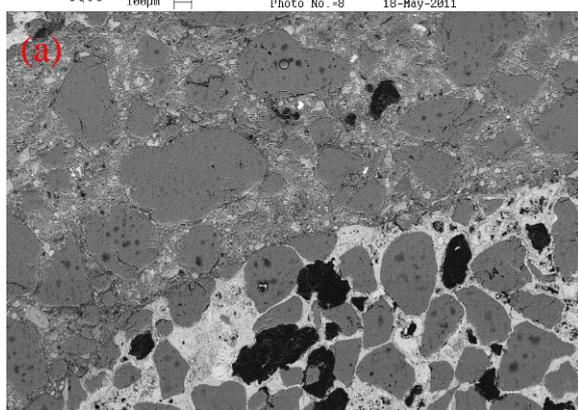


**Figura 92: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LC-Comp3. (a), (b) e (c): ZT abaixo do agregado; (d) e (e): ZT acima do agregado.**



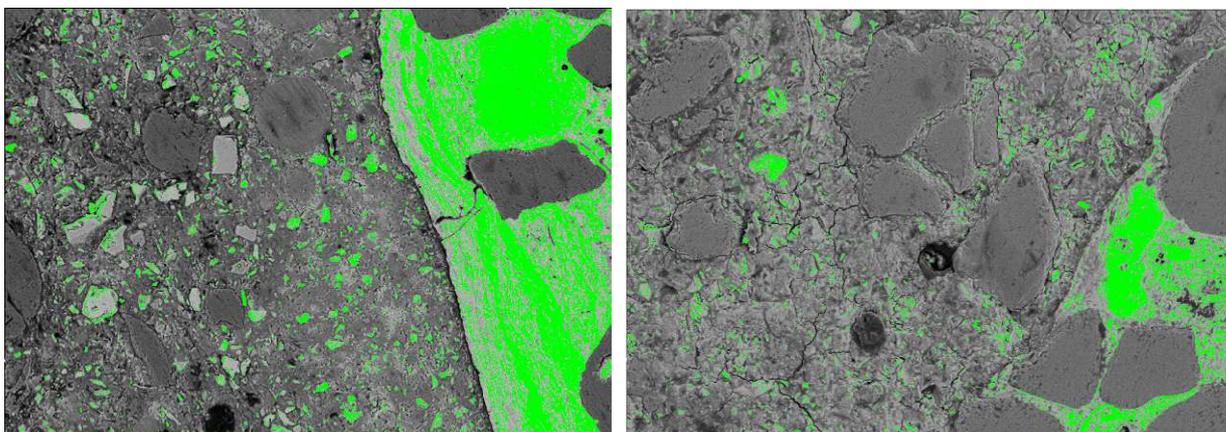
Relações das fases presentes na Micrografia (c) da Figura 93 - Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	CH	56,57	-	56,57
2	C-S-H	1,40	0,23	1,10
3	E	1,11	0,23	0,89



**Figura 93: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de LD-Comp3.  
(a): ZT acima do agregado; (b), (c), (d), (e) e (f): ZT acima do agregado.**

Em todos os concretos lateríticos dopados foi possível distinguir a camada de impregnação pela concentração das partículas anidras de cimento, representadas pelos pontos de coloração clara, nas proximidades do agregado laterítico, tanto na região da ZT localizada abaixo do agregado quanto na localizada acima deste, confirmando a permanência da camada de dopagem na laterita após a confecção do concreto. Verificou-se também que a espessura da camada de impregnação varia de acordo com a conformação superficial da laterita (conjunto de micrografias da Figura 88 a Figura 93), sendo mais espessa em regiões de maior reentrância. Na Figura 94 estão destacadas as partículas anidras de cimento, mostrando a diferença entre os concretos dopados e os de referência e a concentração destas partículas na região da zona de transição. A coloração verde dentro da laterita refere-se ao elemento químico ferro.



**Figura 94: Micrografias (500x) das amostras de LD-Comp1 (esq.) e LC (dir.) evidenciando partículas anidras de cimento.**

O efeito do empacotamento de partículas é visualizado nas micrografias da Figura 88 e Figura 89, correspondentes aos concretos LC-Comp1 e LD-Comp1 respectivamente. Comparados aos concretos elaborados com apenas uma areia (micrografias da Figura 84, Figura 85 e Figura 86), nota-se que ocorreu diminuição na distância entre os agregados e houve composição granulométrica mais contínua das partículas. Juntamente com os resultados mecânicos, conclui-se que o uso de um alto empacotamento, com distribuição granulométrica contínua, é fundamental para a obtenção de altas performances.

Chama-se a atenção para a ausência de descontinuidade entre a calda de impregnação e a pasta do concreto, mostrada na micrografia (c) da Figura 89, do traço LD-Comp1. A boa ligação entre estas camadas demonstra que o procedimento de dopagem adotado neste estudo foi adequado e está compatível com o objetivo proposto. Em todos os

traços lateríticos dopados não houve descontinuidade das ligações camada de impregnação/agregado e pasta do concreto/camada de impregnação.

Apesar dos concretos LC-Comp2 e LD-Comp2 não terem sido elaborados com empacotamento dos agregados, observa-se nas micrografias da Figura 90 e Figura 91 melhora da zona de interface dos agregados com a pasta e refinamento da estrutura de poros desta, condizente com o elevado desempenho mecânico apresentado por estes concretos. A explicação está no emprego de relação  $a/agl$  suficientemente baixa, conseguida com o uso intensivo de aditivos de alto poder de plastificação e redução de água. Desta forma, o acúmulo de filme de água em torno do agregado graúdo é reduzido, favorecendo a zona de transição e conseqüentemente a resistência do concreto. Além do uso de 10% de sílica ativa, que resulta num acentuado refinamento dos poros, conseqüente da redução do hidróxido de cálcio pela reação pozolânica entre este produto e a sílica e do maior preenchimento conseguido com o efeito fíler.

Ao associar a técnica de empacotamento dos agregados e uso de aditivos e adições, foi possível refinar um pouco mais a zona de transição pasta/agregados dos concretos LC-Comp3 e LD-Comp3, conforme visto nas amostras da Figura 92 e Figura 93.

Comparando o efeito da técnica de dopagem nos diversos traços complementares estudados, percebe-se que a técnica contribui no refinamento da zona de transição de todos eles, independentemente se existe ou não outras técnicas associadas. Entretanto, torna-se mais difícil avaliar esta contribuição quando a própria matriz do concreto é de alto desempenho, capaz de envolver os agregados e propiciar a dopagem do concreto como um todo.

Em todas as amostras de concreto estudadas observa-se a presença de escória granulada de alto-forno. Pelo fato da hidratação da escória ocorrer muito lentamente e os ensaios microscópicos terem sido realizados aos 28 dias de idade, era de se esperar que este subproduto fosse encontrado. A partícula de escória ativada pelo cimento Portland mostra sinais de início de reação após 7 dias de hidratação e mesmo após 28 dias a hidratação da escória permanece incompleta, sendo que até em concretos com longa idade algumas partículas de escória ainda podem ter um núcleo não hidratado (SARKAR e colaboradores, 1990). Além do mais, o alto consumo de CH nos primeiros 7 dias da reação pozolânica com a sílica ativa traz dificuldades para a escória obter a cal (um dos ativadores primários) necessária para sua hidratação.

A pasta de cimento do concreto e a calda de impregnação do agregado apresentaram variações nas relações  $Ca/Si$  e  $Ca/(Si+Al)$ , particularmente quanto ao C-S-H que é o produto de maior interesse neste estudo. Estas relações, obtidas por EDS, variam

com a presença de adições minerais e químicas e são bastante exploradas na literatura. Por exemplo, o C-S-H produzido na hidratação dos aglomerantes hidráulicos em presença de escória de alto-forno é diferenciado pela relação  $\text{CaO/SiO}_2$ , segundo a origem, cujo valor diminui na ordem: cimento Portland > escória de alto-forno > pozolana (MEHTA & MONTEIRO, 1994). A composição do C-S-H formado na hidratação do cimento com escória é diferente do obtido com o cimento comum, não somente devido a menor relação Ca/Si, mas também pelo elevado teor de álcalis (WU e colaboradores, 1990). A análise elementar por EDS também mostra que o novo C-S-H, formado através da hidratação da partícula de escória, é mais rico em “Mg” e “Al” e é menos cálcico em relação ao C-S-H formado pelo clínquer (GLASSER, 1991; RICHARDSON; GROVES, 1992).

As variações nas taxas Ca/Si de um ponto para outro dentro da matriz de C-S-H da pasta cimento Portland refletem a variável composição do C-S-H, mas também pode ser por causa da presença de outras fases intimamente misturadas ao C-S-H, tendo possivelmente substituições iônicas (KJELLEN e colaboradores, 1996). Ou ainda em função do progresso de hidratação do cimento, tendendo sempre a reduzir-se da idade inicial para a final (MELO, 2000).

Especificamente em relação aos teores de adição no cimento (escória e pozolana), a relação  $\text{CaO/SiO}_2$  do C-S-H oscila entre 1,7 a 2,0 para cimentos sem adição, entre 1,4 e 1,7 nos cimentos Portland de alto-forno e entre 1,0 e 1,4 nos cimentos Portland pozolânicos (UCHIKAWA, 1986). O que está de acordo com o encontrado nas amostras estudadas.

Destaca-se também o fato da adição de sílica ativa alterar as relações Ca/Si e Ca/(Si+Al) no sentido de diminuí-las (um fato mencionando na literatura especializada), e por isso as baixas relações verificadas na calda de alto desempenho.

Em muitos casos, verificou-se que nas regiões próximas da zona de transição, locais de contato com a laterita, as relações entre os elementos Ca e Si diminuiram, contrapondo com os aumentos das relações entre Al e Ca. Este fato é explicado pela própria composição da laterita, rica em alumínio e ferro.

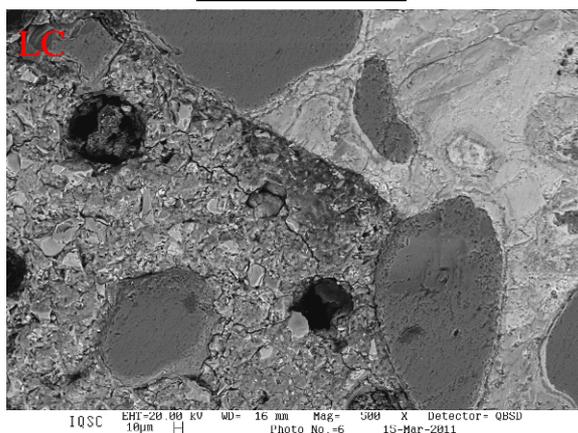
Algumas micrografias representativas das amostras controle e dopada são apresentadas na magnificação 500x para auxiliar no estudo semi-quantitativo das fases presentes em cada amostra. A estimativa da porcentagem foi feita com base nas quantidades das diferentes tonalidades de cinza da amostra, utilizando-se recursos de processamento de imagem para discretizar cada tom.

Nas fases devidamente identificadas com auxílio do EDS, calculou-se de forma aproximada, as porcentagens correspondentes a cada fase da amostra: grão anidro (A),

portlandita (CH), outros produtos hidratados (OPH), incluindo o C-S-H, e poros (P). A discriminação das fases presentes na amostra pelos tons de cinza variou de branco (claro) para a fase A, a médio para a fase CH, a escuro para a fase OPH e a preto para a fase P, conforme especificado por Melo (2000) e Silva (2000). O cálculo das porcentagens de cada fase foi feito considerando-se a área contida na micrografia, sem a parcela referente aos agregados, e, portanto, não devem ser associadas em momento algum com as porcentagens das fases existentes no volume de sólidos da pasta completamente hidratada. Este é um cálculo aproximado, conforme dito, e que fornece indícios do comportamento dos concretos. Levou-se em conta, evidentemente, a lógica da evolução da hidratação para verificar a coerência entre os valores encontrados.

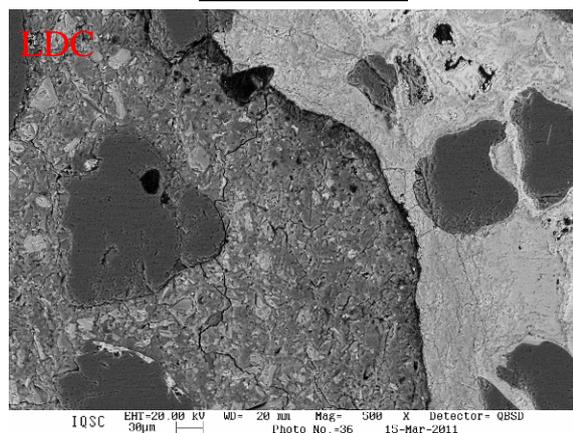
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LC

Fases	%
A	8,9
CH	32,2
OPH	34,1
P	24,8



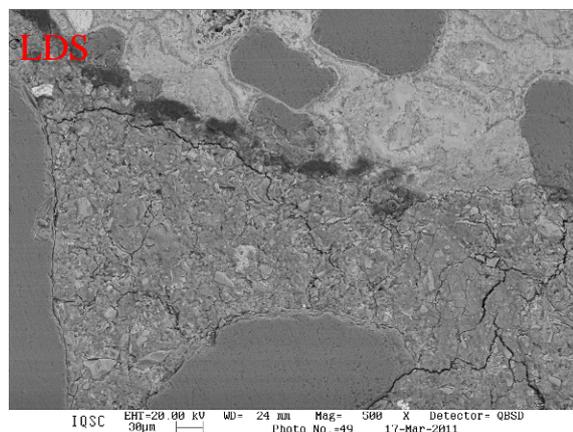
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LDC

Fases	%
A	14,9
CH	29,7
OPH	41,8
P	13,6



Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LDS

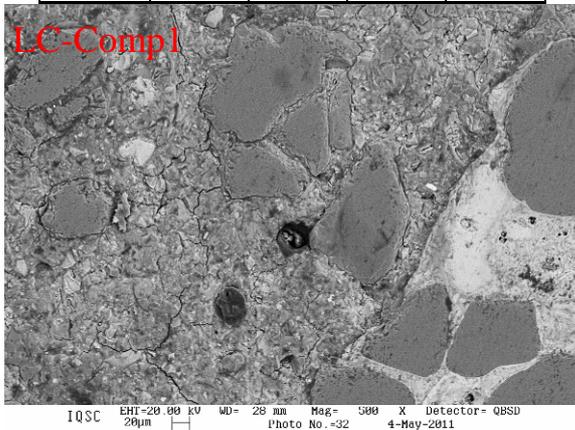
Fases	%
A	6,9
CH	37,3
OPH	36,0
P	19,8



**Figura 95: Estudo semi-quantitativo das fases presentes nos traços lateríticos LC, LDC e LDS.**

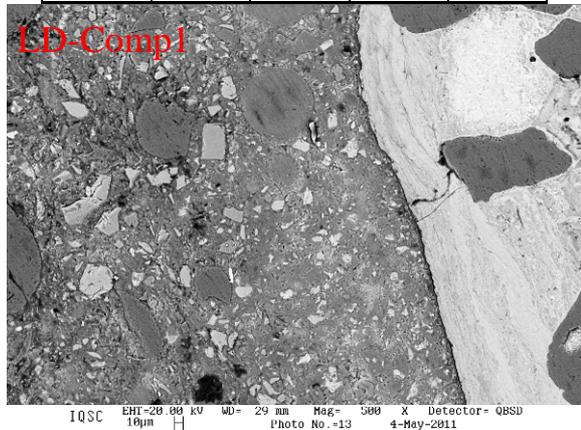
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LC-Comp1

Fase (%)	A	CH	OPH	P
	12,0	31,8	42,5	13,7



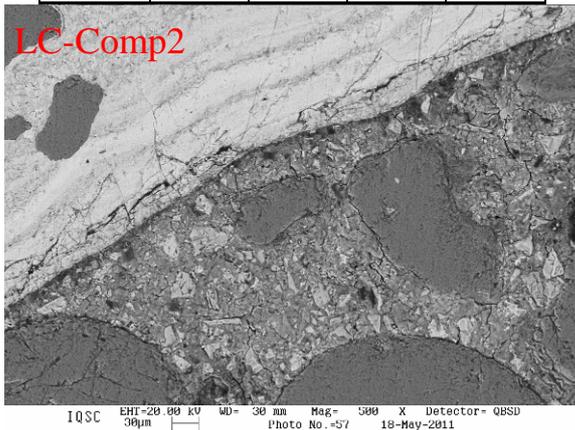
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LD-Comp1

Fase (%)	A	CH	OPH	P
	14,4	25,8	44,5	15,3



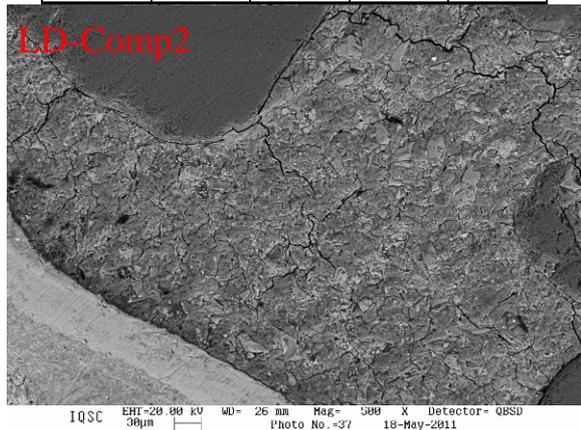
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LC-Comp2

Fase (%)	A	CH	OPH	P
	12,2	22,3	50,7	14,8



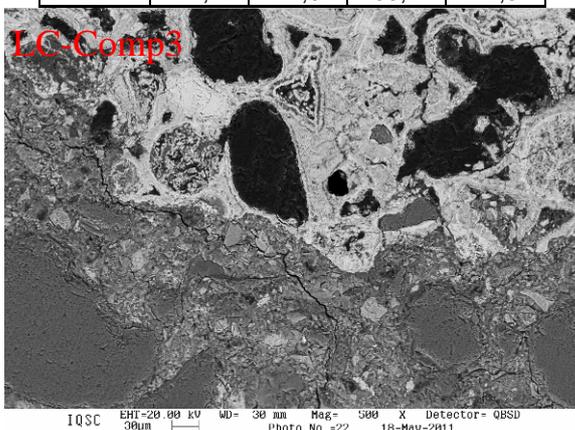
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LD-Comp2

Fase (%)	A	CH	OPH	P
	16,5	15,1	54,6	13,8



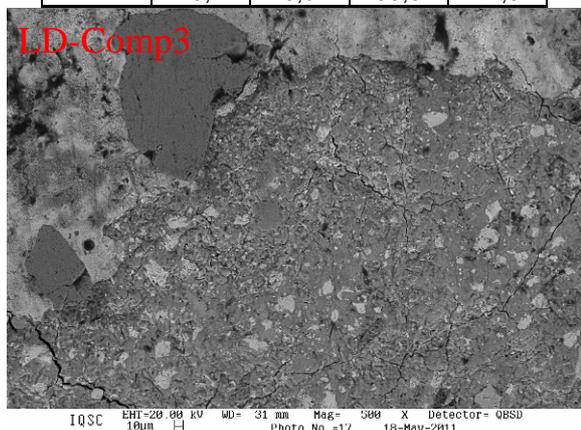
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LC-Comp3

Fase (%)	A	CH	OPH	P
	17,7	14,6	55,2	12,5



Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço LD-Comp3

Fase (%)	A	CH	OPH	P
	19,1	9,5	59,9	11,5



**Figura 96: Estudo semi-quantitativo das fases presentes nos traços lateríticos complementares.**

O estudo semi-quantitativo mostrado na Figura 95 e Figura 96 confirma a existência de maior porcentagem da fase anidra (A) nos concretos dopados com calda de alto desempenho. A diferença chega a 67% para os traços LC e LDC, dada a grande diferença nas relações  $a/agl$  das matrizes: 0,57 e 0,35, respectivamente. A diferença torna-se menor no caso dos traços complementares, não ultrapassando 8% entre os traços LC-Comp3 e LD-Comp3, que possuem matrizes de cimento semelhantes. A redução de 22% no percentual anidro do traço LDS, comparado ao traço LC, se baseia no possível acréscimo de água proveniente da saturação da laterita com a solução de água e sílica ativa.

Com exceção da amostra LD-Comp1 que teve a porcentagem de poros aumentada em 12% se comparada à respectiva amostra controle, devido à maior porosidade da matriz do concreto, as demais amostras dopadas apresentaram redução na quantidade de poros, justificada pela densificação da camada de dopagem na zona de transição. A redução foi em torno de 8% para os traços complementares e atingiu 45% para o traço LDC, mostrando mais uma vez que os efeitos da dopagem são mais pronunciados para traços convencionais de concreto.

Fica claro que a técnica de empacotamento de partículas, empregada nos traços LC-Comp1, LD-Comp1, LC-Comp3 e LD-Comp3, resulta em diminuição da quantidade de vazios, conforme visto nos resultados detalhados na seção 5.2.1. (Empacotamento dos agregados).

Um estudo exacerbando as alterações na velocidade de hidratação devido ao uso de superdosagem de SP em concretos tem demonstrado que a maior porosidade está relacionada com o uso de SP, indicando uma redução nas reações de hidratação do cimento (GU e colaboradores, 1994). Tal diferença na porosidade é maior para as primeiras idades de hidratação e diminui para idades maiores (28 dias). O referido estudo demonstra que altas dosagens de SP não apenas têm um grande efeito no processo de hidratação nas primeiras idades, mas também no desenvolvimento da microestrutura em idades mais avançadas. Para pastas com SP há menores quantidades de C-S-H na superfície das partículas de cimento não-hidratadas, comparando-se com as pastas de controle, e, além disso, apresentam grandes quantidades de CH cobrindo a superfície de suas partículas (confirmado pelo MEV) (GU e colaboradores, 1994). Apesar do teor de 2% de superplastificante utilizado nos traços complementares (Comp2 e Comp3) estar acima do limite indicado pelo fabricante, não houve aumento na porosidade e nem diminuição da quantidade de C-S-H destes concretos, conforme Figura 96.

Silva (2000), a partir de experiência obtida no estudo de MEV em amostra polida, observou que a análise total do que é considerado C-S-H e outras fases de produtos

hidratados (OPH) aumentam com a evolução da idade e diminui com o aumento da relação água/aglomerante. Considerando que todas as amostras foram ensaiadas na idade de 28 dias, o incremento na porcentagem da fase OPH é atribuído à diminuição da relação a/agl. Conforme visto nas micrografias da Figura 95 e Figura 96, os traços complementares Comp2 e Comp3 tiveram maior porcentagem de OPH que o traço complementar Comp1 e o traço LC.

Independente do traço, o incremento da fase OPH foi ainda maior para os concretos executados com emprego da técnica de dopagem dos materiais. Quando foi aplicada somente a dopagem dos agregados graúdos, o aumento chegou a 20% (comparando os traços LC e LDC), e à medida que outras técnicas foram associadas este ganho passou para 8%, em média (comparando traços complementares). Isto é perfeitamente compreensível uma vez que a matriz de alto desempenho do concreto já tem grande contribuição na fase OPH.

Favorecendo beneficemente para o desempenho mecânico e microestrutural dos concretos dopados, observa-se a diminuição da quantidade de CH nestas misturas. A relação de aumento e diminuição entre essas fases ocorre devido ao uso da sílica ativa na calda de impregnação. O emprego da sílica ativa reduz extremamente a formação de CH ou reduz a dimensão dos cristais de CH, afetando, assim, a sua morfologia (vista mais adiante nas micrografias das amostras fraturadas de concreto). Esse fator favorece também a ausência de zona de transição comprimindo cristais de CH e ajudando na formação de uma ligação pasta/agregado muito mais forte. Observa-se que as amostras contendo SA apresentam uma textura bem mais homogênea e refinada dos grãos. Isso pode ser explicado pelo efeito de dispersão e nucleação que a sílica ativa promove na matriz, tornando-a mais compacta.

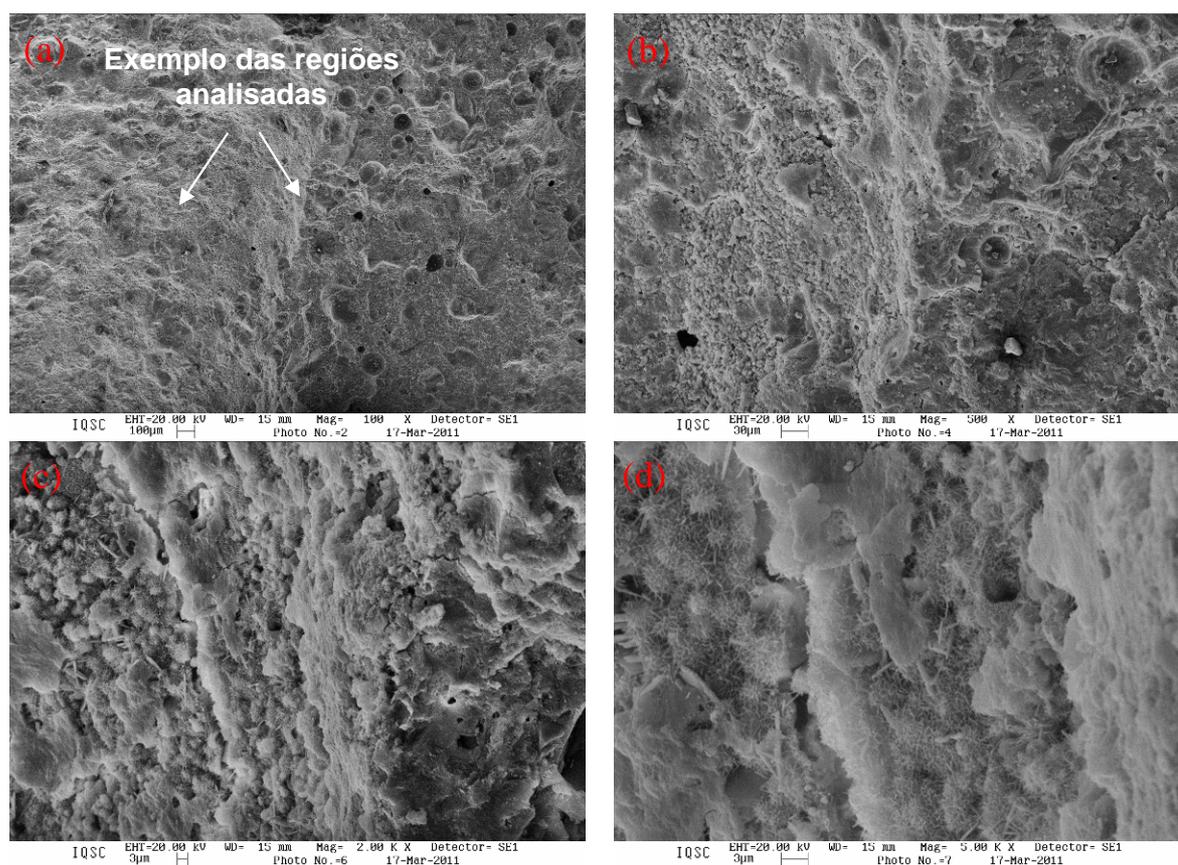
Na Figura 95 embora o traço LDS apresente uma quantidade de OPH (outros produtos hidratados) maior que o traço de referência LC, a queda na resistência à compressão apresentada por este traço dopado (resultado apresentado na seção 5.6.1) é justificada com base na elevada presença de poros presentes na zona de transição pasta/agregado, o que prejudicou bastante a aderência entre o agregado laterítico dopado com solução de água e sílica ativa e a pasta do concreto. Além do mais, a porcentagem de CH presente no concreto LDS foi 3% superior à apresentada pelo concreto LC e 26% superior a do concreto LDC.

As micrografias apresentadas na seqüência foram obtidas de amostras fraturadas dos concretos lateríticos controles e dopados, em que foram observadas a morfologia e as diferenças entre os produtos de hidratação existentes. Nessas imagens, teve-se interesse

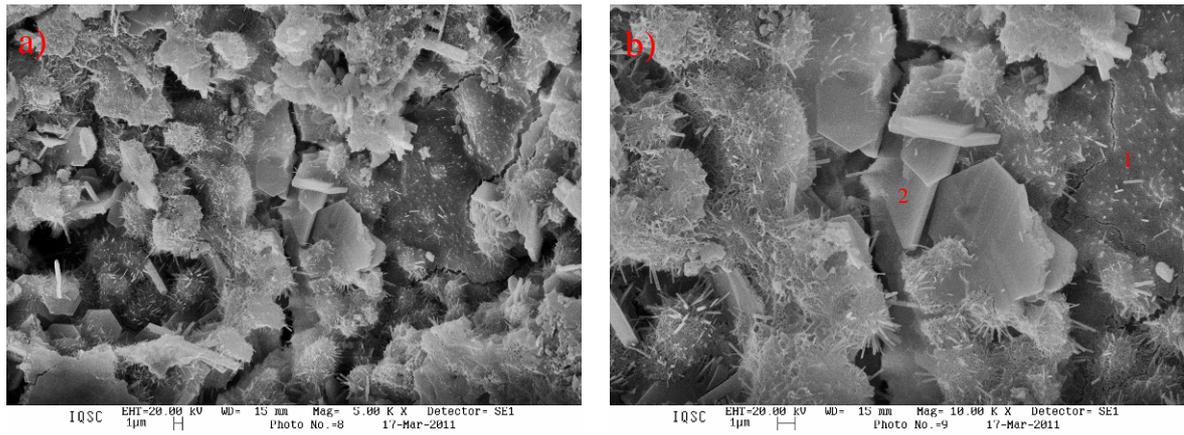
em analisar a pasta da região onde o agregado graúdo foi retirado (local onde existia a laterita) e a região de transição entre a pasta do concreto e a pasta onde antes estava o agregado.

Para exemplificar as regiões analisadas, na Figura 97, à esquerda da micrografia (a) é mostrada a pasta onde antes estava o agregado, ou seja, a pasta da região onde o agregado foi retirado, e à direita desta micrografia, a pasta do concreto. As observações ocorreram no centro da região à esquerda e no limite dessas duas pastas, conforme indicado pelas setas.

A partir das amostras fraturadas podem ser reconhecidos os dois produtos hidratados em maior quantidade no sistema de pasta endurecida de cimento Portland (C-S-H e CH). O CH tem tendência a formar grandes cristais (prismas hexagonais) que variam de formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas. Já o C-S-H, exibe uma morfologia que varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino.



**Figura 97: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC.**



Fases presentes na Micrografia (b) da Figura 98 –  
Relações em %

	Fase	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	2,40	0,16	1,86
2	CH	23,86	0,08	11,96

Figura 98: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.

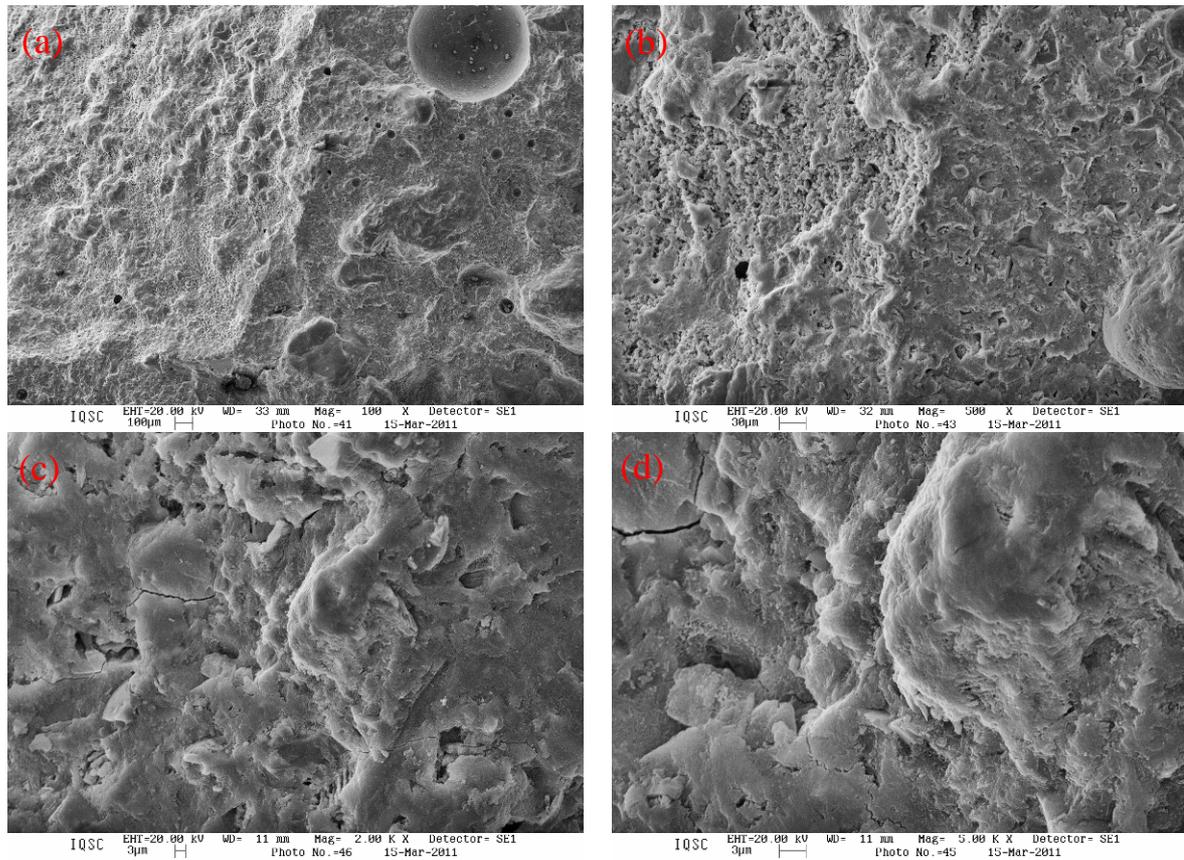
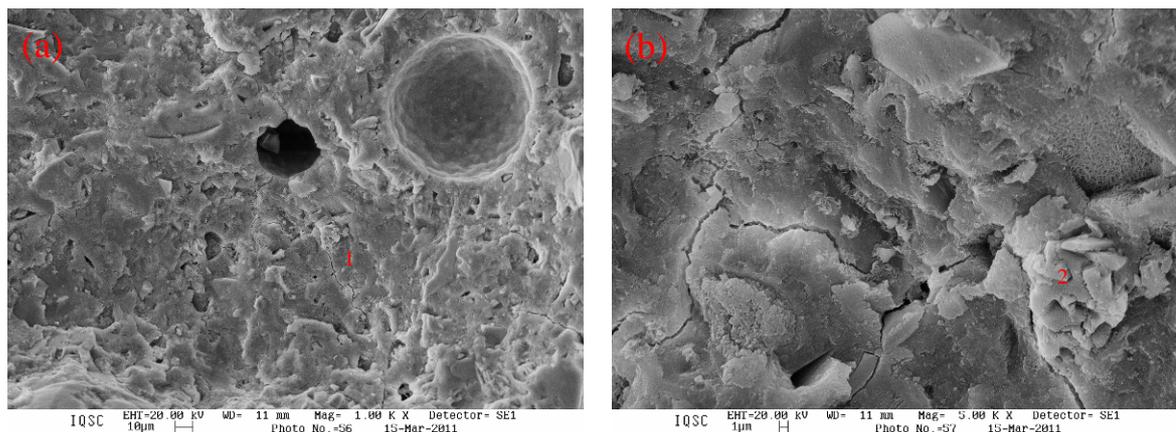


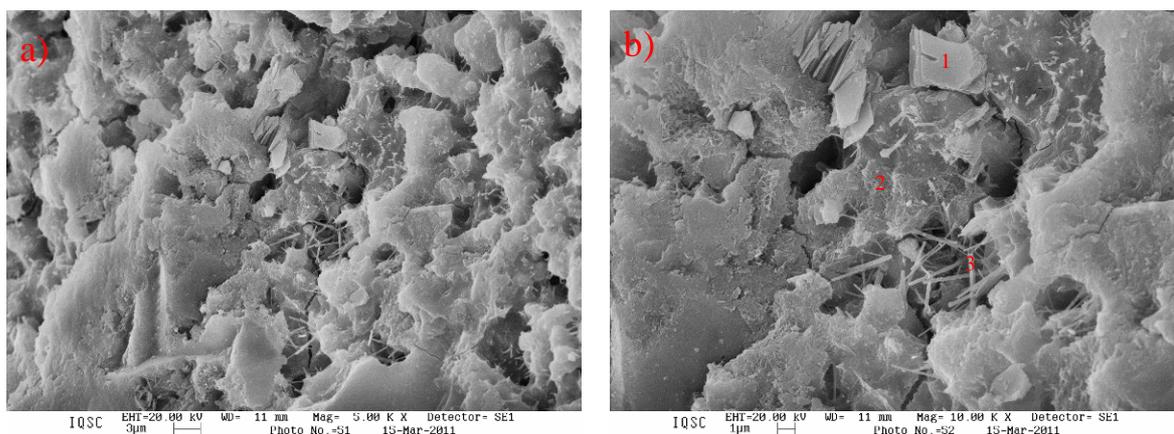
Figura 99: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LDC.



Fases presentes nas Micrografias (a) e (b) da Figura 100 – Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	1,72	0,14	1,41
2	E	0,89	0,44	0,71

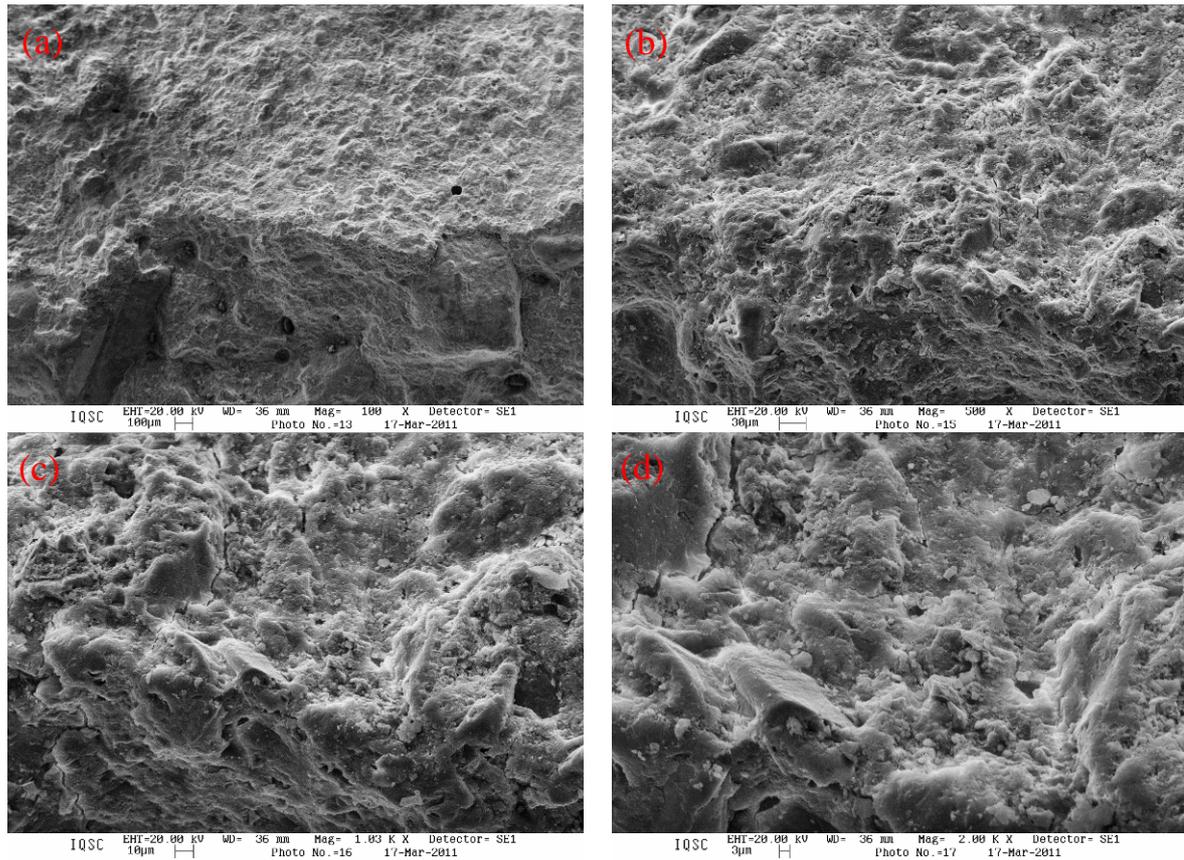
Figura 100: Micrografias (1000x e 5000x) para amostra fraturada de LDC, evidenciando a região da pasta do concreto.



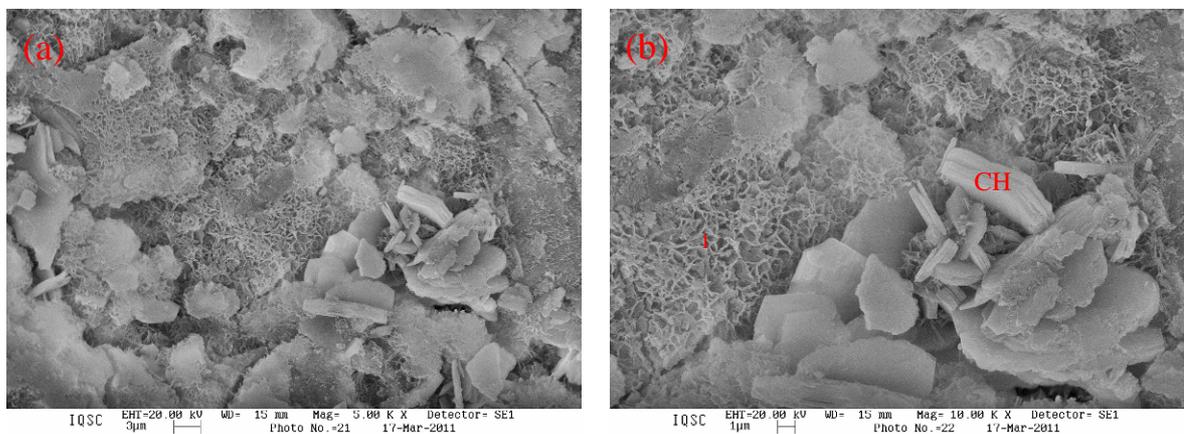
Fases presentes na Micrografia (b) da Figura 101 – Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	CH	21,99	0,01	17,28
2	C-S-H	1,87	0,15	1,53
3	C-S-H	1,93	0,18	1,48

Figura 101: Micrografias (5000x até 40000x) para amostra fraturada de LDC, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.



**Figura 102: Micrografias (100x até 2000x) para amostra fraturada de LDS.**



**Fase presente na Micrografia (b) da Figura 103 –  
Relações em %**

	Fase	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	1,76	0,15	1,43

**Figura 103: Micrografias (2000x até 10000x) para amostra fraturada de LDS, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.**

Comparando as amostras LC e LDC, a partir do conjunto de micrografias da Figura 97, Figura 98, Figura 99, Figura 100 e Figura 101, nota-se que a amostra controle apresenta grande quantidade de hidróxido de cálcio e que este produto está bem caracterizado,

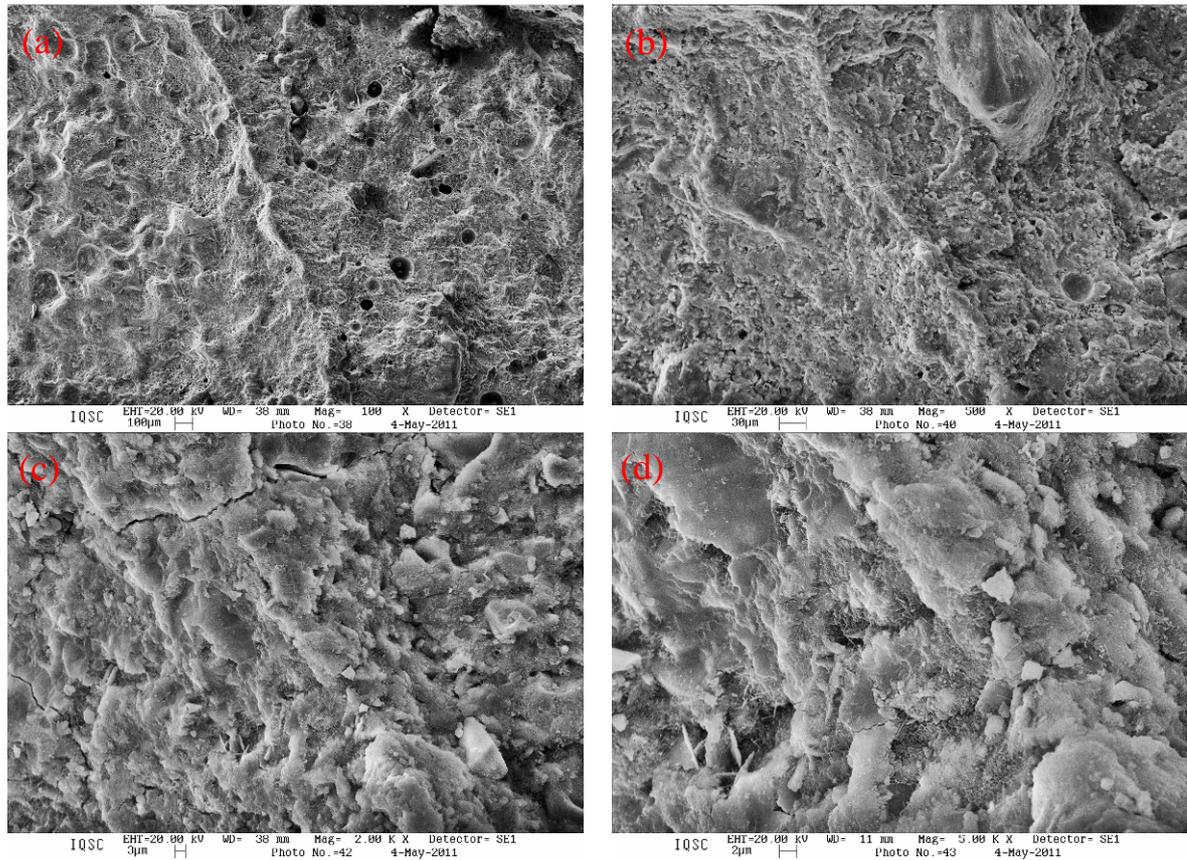
apresentando-se em grandes cristais (prismas hexagonais) na forma de pilhas de placas geometricamente bem definidas. A fratura dessa amostra exhibe o ponto frágil, cuja ruptura coincide com as placas de CH. Já nas micrografias da amostra dopada observa-se que a quantidade e o tamanho dos cristais de CH diminuíram. Observa-se também maior abertura das microfissuras na amostra controle se comparada à abertura na amostra dopada.

O silicato de cálcio hidratado presente na amostra dopada tem morfologia diferenciada do exibido na amostra controle. Percebem-se então duas formações distintas para o C-S-H: no caso da amostra dopada que contém sílica ativa na calda de alto desempenho (traço LDC), o C-S-H apresenta-se em forma de cristais aciculares curtos (Figura 101b), enquanto na amostra de referência LC (Figura 98), o C-S-H apresenta-se em forma de feixes fibrosos compactos ou fibras pouco cristalinas. Tais diferenças ocorrem em razão da presença da adição, o que está de acordo com a literatura.

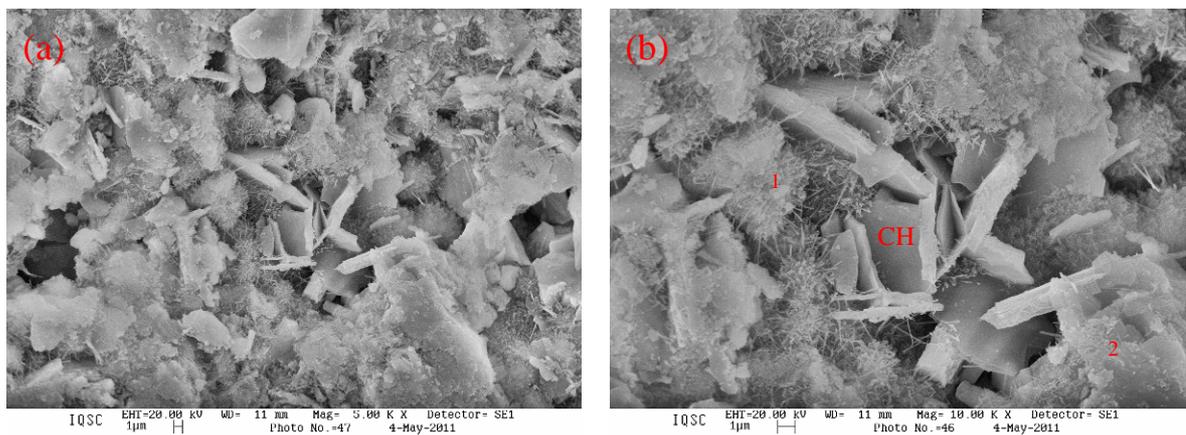
Com base nestas observações, pode-se concluir que ao aplicar a técnica de dopagem dos materiais ocorre melhoria na zona de transição pasta/agregado do concreto, por meio de refinamento dos poros e modificação dos produtos de hidratação. A baixa relação  $a/agl$  da calda de dopagem e a reação pozolânica ocorrida entre o hidróxido de cálcio e a sílica ativa foram os principais responsáveis pela formação de uma densa zona de transição com pequenos cristais de CH não orientados.

Analisando as amostras de concreto LDS, cuja dopagem foi feita com solução de água, nota-se que a quantidade e o tamanho dos cristais de CH além de não diminuírem na presença da sílica, aumentaram se comparado ao traço controle LC. Isto está bem caracterizado na micrografia b da Figura 103. A maior presença deste produto mais frágil que o C-S-H e que é orientado preferencialmente com o eixo central normal à superfície do agregado, favorece o surgimento de microfissuras na zona de transição, comprometendo a ligação entre a laterita e a pasta do concreto e inviabilizando esta forma de dopagem. O resultado aqui apresentado é condizente com o da amostra polida deste traço e com o mecânico discutido na seção 5.6. (Avaliação das propriedades mecânicas).

A Figura 104, Figura 105, Figura 106 e Figura 107 mostram as micrografias fraturadas dos traços lateríticos LC-Comp1 e LD-Comp1, elaborados com empacotamento de partículas. Pelo fato de nestes traços complementares terem sido utilizados o mesmo consumo de cimento e a mesma relação  $a/agl$  dos traços LC e LDC, também são observadas consideráveis quantidades de CH em grande placas hexagonais, no caso do concreto controle, e refinamento da matriz (diminuição de CH e modificação do C-S-H) no caso do concreto dopado. Fica evidente a diminuição da abertura das microfissuras das amostras LC-Comp1 e LD-Comp1, resultando em ganho no desempenho mecânico.



**Figura 104: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC-Comp1.**



**Fases presentes na Micrografia (b) da Figura 105 – Relações em %**

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	1,89	0,23	1,40
2	C-S-H	1,41	0,16	1,20

**Figura 105: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC-Comp1, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.**

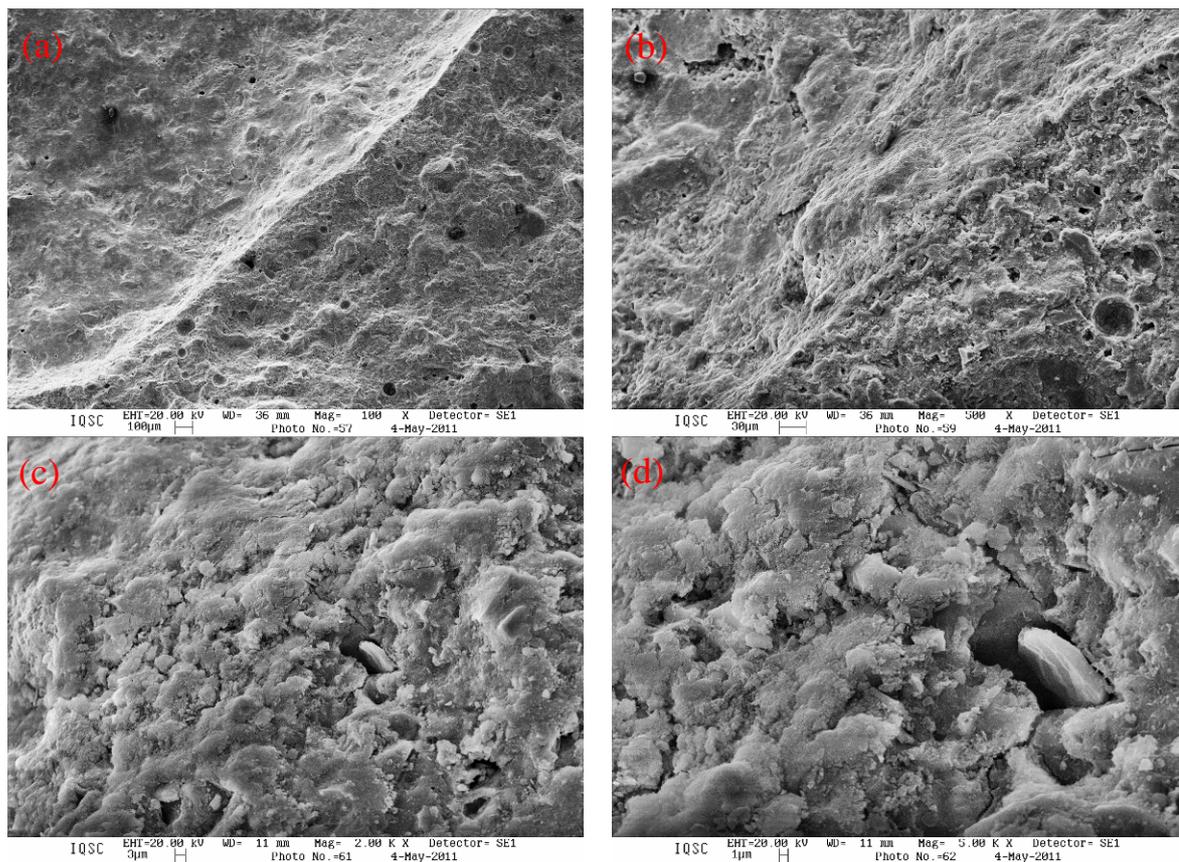
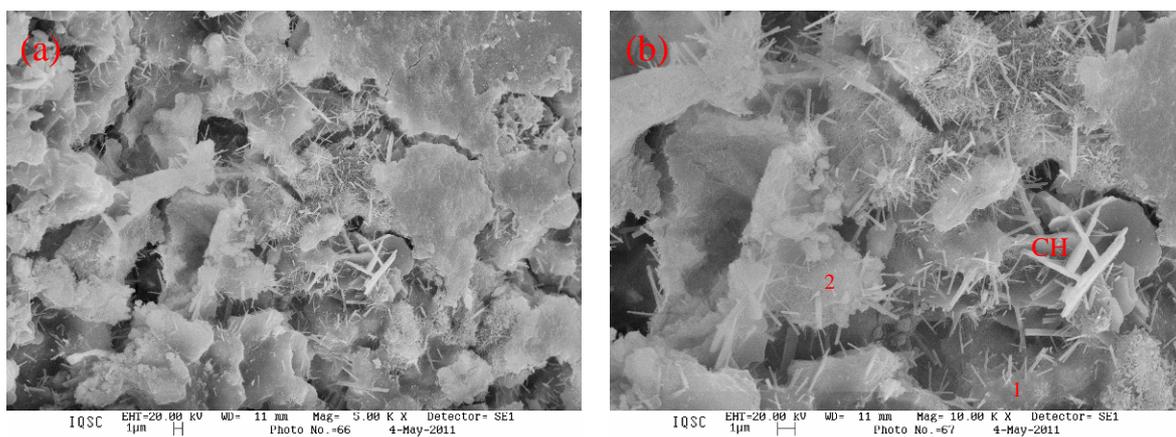


Figura 106: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LD-Comp1.

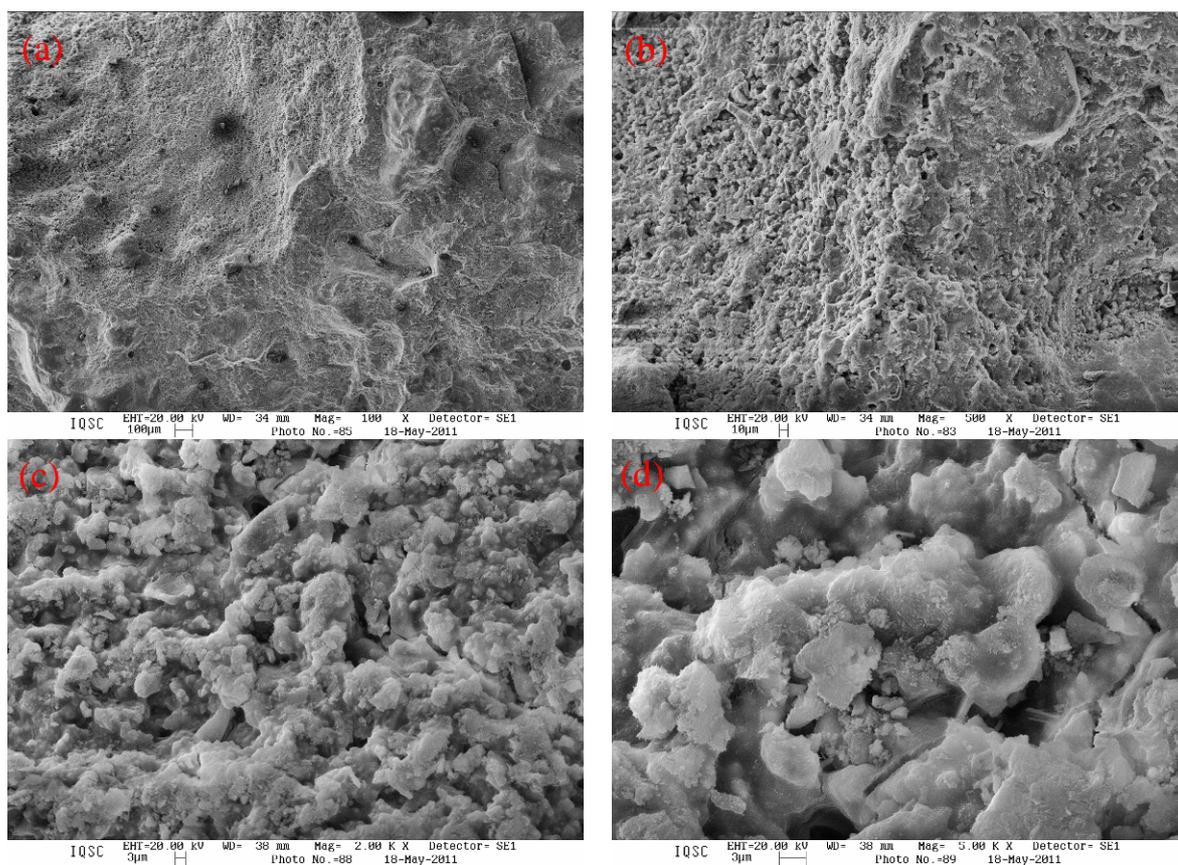


Fases presentes na Micrografia (b) da Figura 107 –  
Relações em %

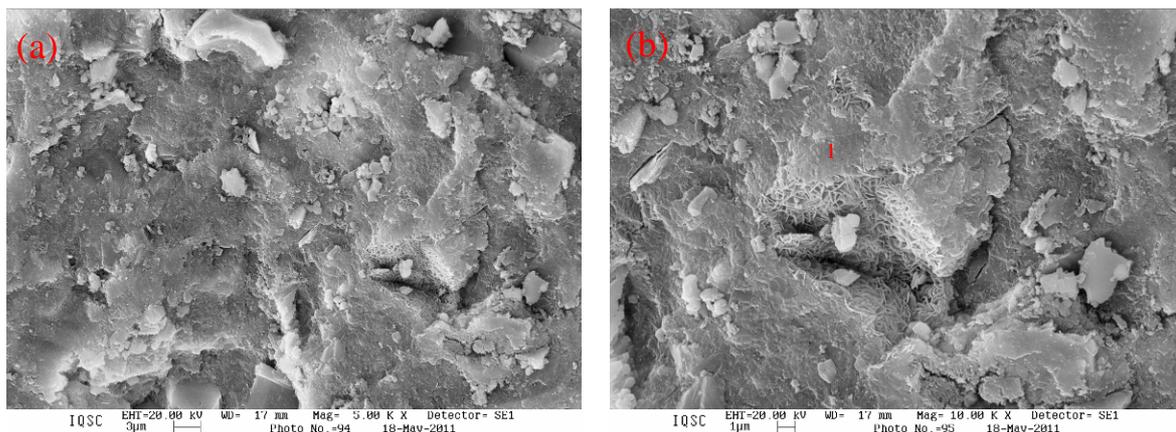
	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	1,50	0,23	1,12
2	C-S-H	1,48	0,22	1,16

Figura 107: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LD-Comp1, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.

As micrografias mostradas na Figura 108, Figura 109, Figura 110 e Figura 111 referem-se aos concretos LC-Comp2 e LD-Comp2 elaborados com 10% de sílica ativa em substituição volumétrica ao cimento e 2% de aditivo superplastificante. Comparadas às micrografias anteriores, percebe-se que houve alteração significativa nos produtos de hidratação formados, tanto nos traços controle quanto nos dopados. A quantidade e tamanho do CH foram drasticamente reduzidos e na amostra dopada percebe-se que a pasta de impregnação se tornou bem mais compacta. Conforme consagrado na literatura, a sílica ativa promove a modificação morfológica do C-S-H, por meio da reação pozolânica, produzindo um C-S-H mais resistente e menos solúvel, morfológicamente diferente do C-S-H produzido durante a hidratação do cimento. Contribuindo também para esta melhoria está a relação  $a/agl$  suficientemente baixa (0,40), conseguida com o uso intensivo do aditivo de alto poder de plastificação e redução de água. A associação destes fatores resultou na melhora da zona de interface dos agregados com a pasta e refinamento da estrutura de poros, atribuindo bom desempenho mecânico a estes concretos.



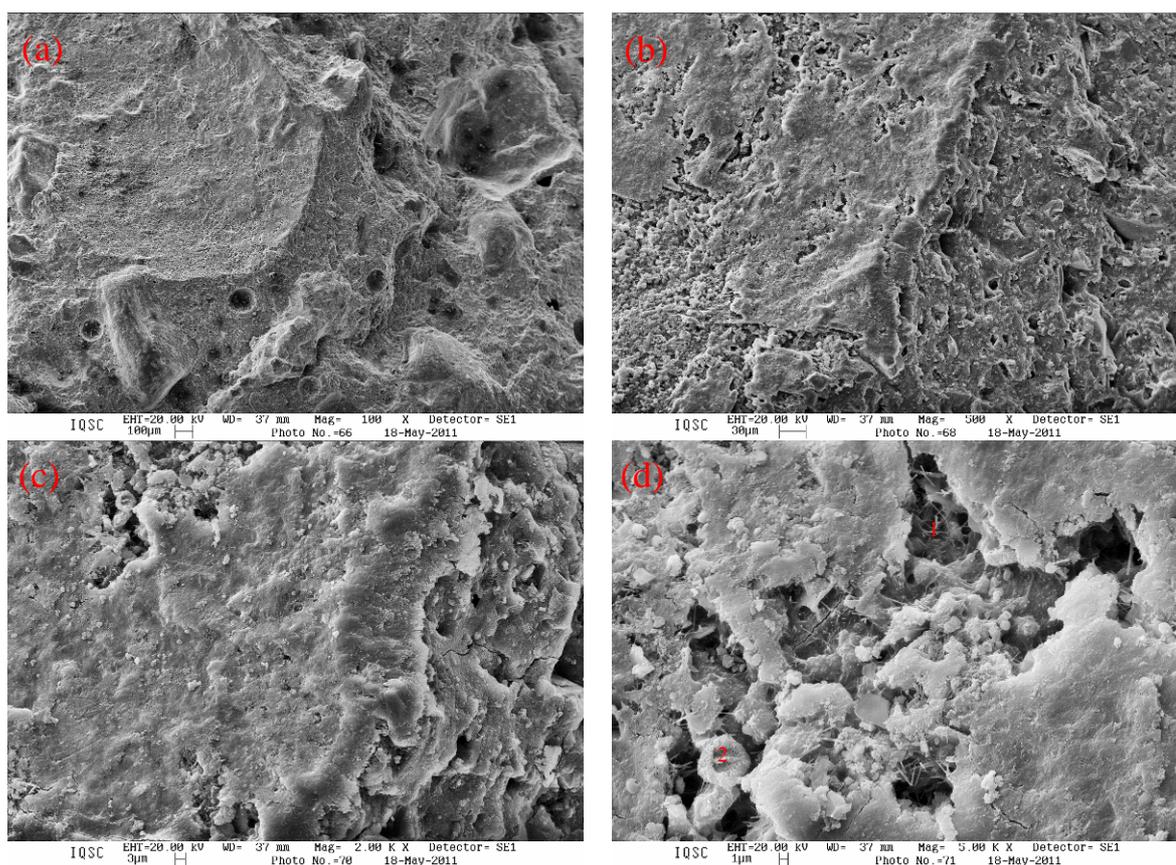
**Figura 108: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC-Comp2.**



Fase presente na Micrografia (b) da Figura 109 –  
Relações em %

	Fase	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	2,28	0,19	1,76

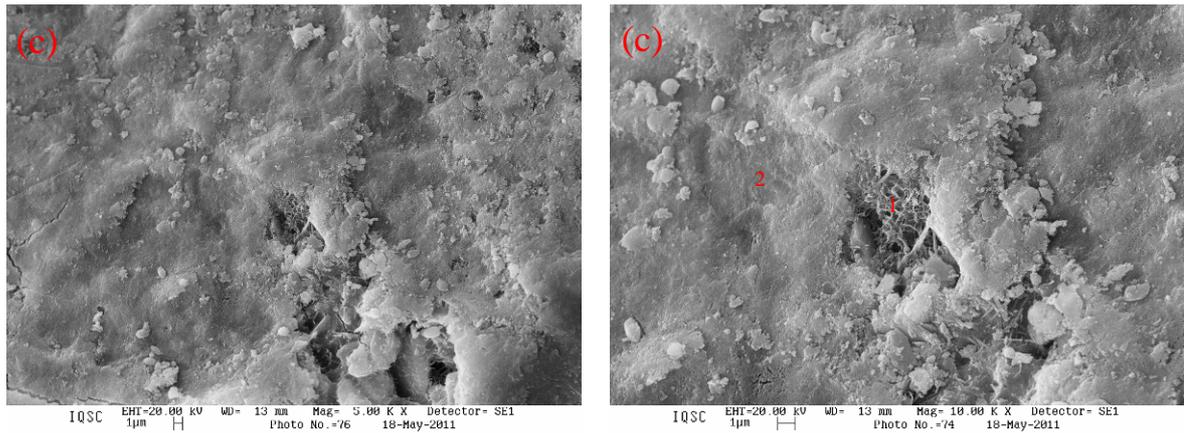
**Figura 109: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC-Comp2, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.**



Fases presentes na Micrografia (b) da Figura 110 –  
Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	2,57	0,13	2,07
2	C-S-H	1,62	0,22	1,23

**Figura 110: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LD-Comp2.**

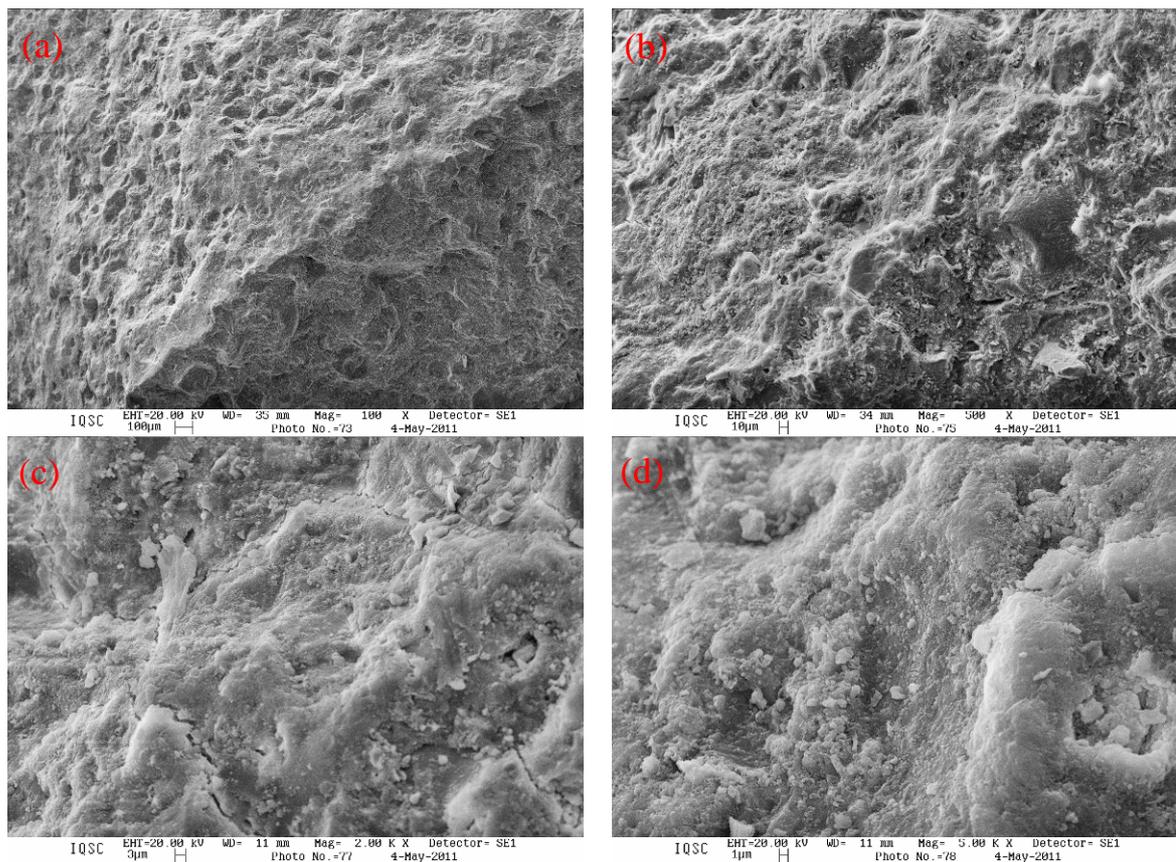


Fases presentes na Micrografia (b) da Figura 111 –  
Relações em %

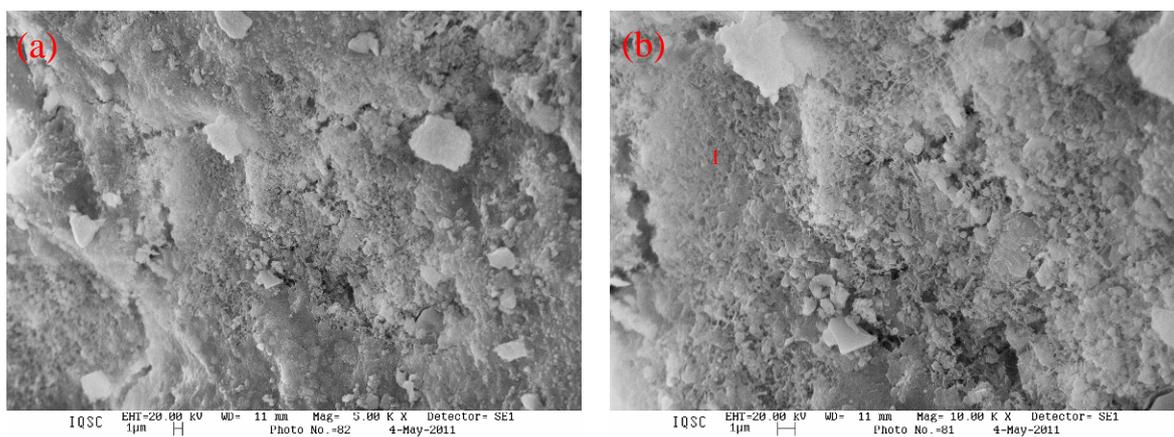
	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	2,63	0,10	2,14
2	C-S-H	1,87	0,15	1,53

**Figura 111: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LD-Comp2, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.**

A melhora da zona de interface dos agregados com a pasta e o refinamento da estrutura de poros foram incrementados ao associar o uso de aditivo e sílica ativa à técnica de empacotamento de partículas, resultando nos concretos LC-Comp3 e LD-Comp3, conforme visto nas micrografias da Figura 112, Figura 113, Figura 114 e Figura 115. Apesar da matriz do concreto de referência já ser de alto desempenho (observa-se sua elevada compacidade) a interação da técnica de dopagem às demais técnicas usadas ainda possibilitou que a matriz fosse aprimorada (comparação da Figura 113 e Figura 115).



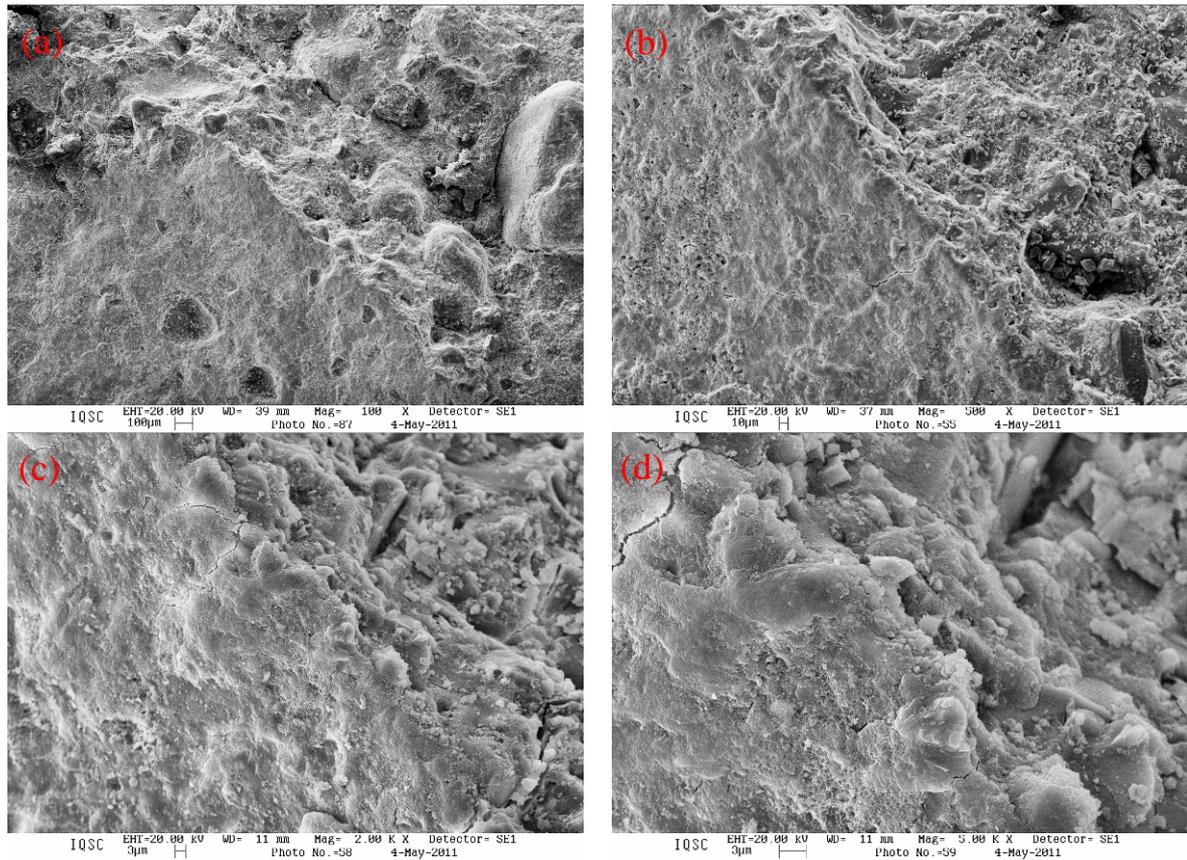
**Figura 112: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LC-Comp3.**



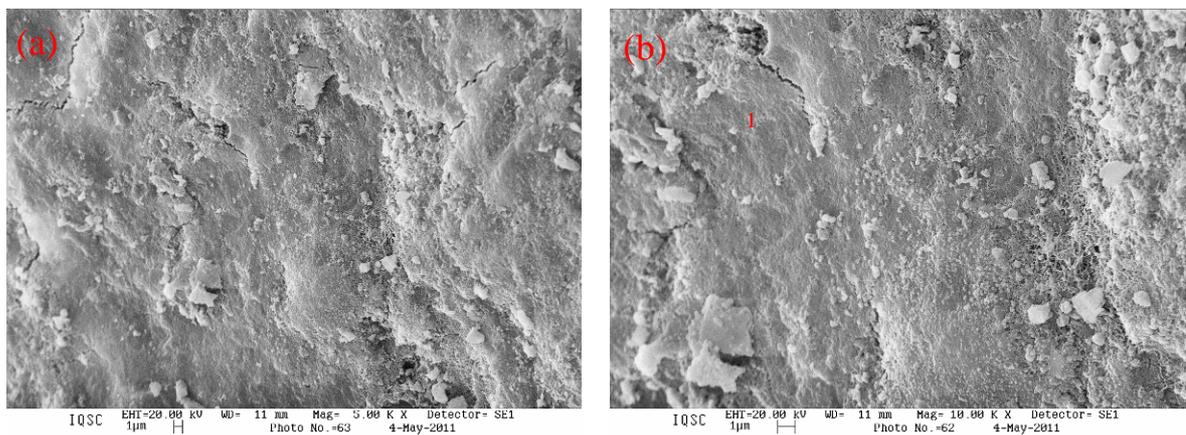
**Fase presente na Micrografia (b) da Figura 113 – Relações em %**

	Fase	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	1,40	0,15	1,23

**Figura 113: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de LC-Comp3, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.**



**Figura 114: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de LD-Comp3.**



**Fase presente na Micrografia (b) da Figura 115 –  
Relações em %**

	Fase	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	1,27	0,20	1,02

**Figura 115: Micrografias (5000x até 20000x) para amostra fraturada de LD-Comp3, evidenciando a região onde a laterita foi retirada.**

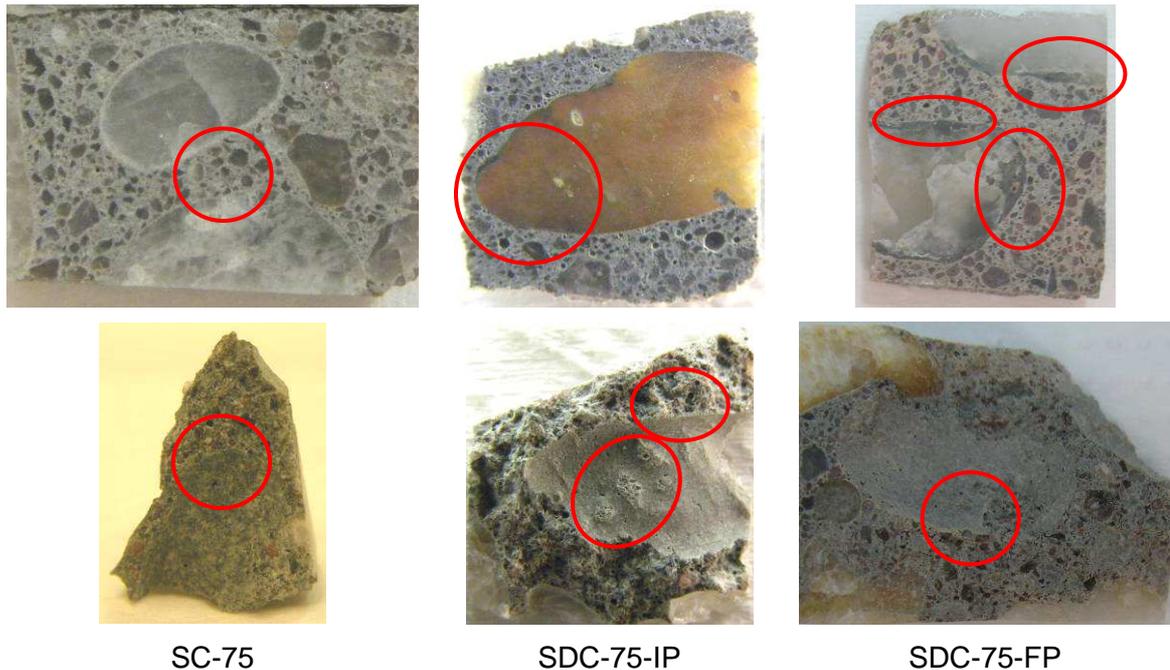
Como pôde ser observado, foram vários os tipos de C-S-H encontrados nas pastas de cimento, os quais apresentaram diferentes relações Ca/Si, que variaram desde 2,63 até 1,19. Taylor (1997) cita 4 tipos morfológicos de C-S-H na análise da microestrutura de pastas de cimento: tipo I, encontrado nas primeiras idades cuja morfologia é constituída de fibras de aproximadamente 2 µm de comprimento; tipo II, descrito em forma de favos-de-mel ou redes reticulares; tipo III, cujo material consiste de finas folhas interconectadas e tipo IV, que aparecem também em idades avançadas, como o tipo 3, porém é um composto mais compacto que o tipo III, cuja morfologia não é bem definida. O autor afirma também que com o aumento da relação Ca/Si, o grau de cristalinidade tende a decrescer. Em geral, a relação Ca/Si apresentada nos concretos dopados apresentaram valores menores que nos respectivos concretos de referência, indicando a formação de compostos menos cristalinos.

Com base nos resultados microscópicos obtidos dos traços complementares, que permitiram conclusões sólidas do benefício da dopagem, optou-se por não realizar o ensaio de MEV nos concretos lateríticos de traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5. Julgou-se que o estudo seria repetitivo e que, além de despender muitas horas de captura e análise de imagens, os recursos financeiros economizados serviriam para avaliação de outros agregados.

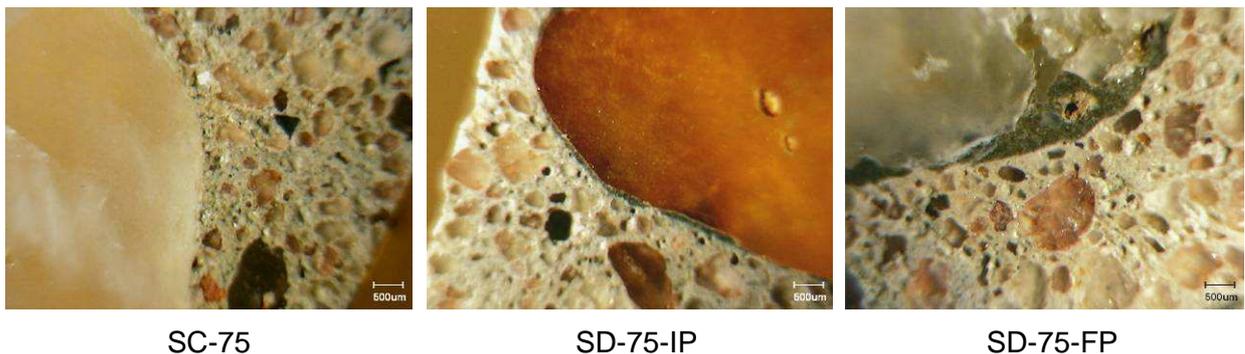
### **5.7.2. Resultados microestruturais do seixo rolado**

Conforme adotado para a laterita, a análise microscópica das misturas com seixo rolado também se iniciou com o estudo da camada de dopagem com microscópio digital MIC-D Olympus. Foram visualizadas a existência de aderência física por ligação mecânica entre o agregado e a pasta e a espessura da camada de dopagem.

A Figura 116 e Figura 117 mostram as amostras, polidas e fraturadas, dos concretos com seixo rolado na composição 1:7,5, escolhidas para análise. Na Figura 116 estão destacadas as áreas de interesse em cada amostra e na Figura 117 as ampliações destas amostras.



**Figura 116: Amostras de concreto 1:7,5 com seixo rolado selecionadas para MEV.**



**Figura 117: Imagens das amostras polidas da Figura 69 ampliadas 24x**

O aumento de 24x permite visualizar a camada de impregnação com a calda de alto desempenho na cor mais escura aderida ao seixo rolado. Estas imagens já dão indícios de que quando o agregado gráudo apresenta forma tendendo à esférica e poucas imperfeições, no caso da amostra SD-75-IP (Figura 117), a camada que permanece aderida tem pequena espessura (varia de 50µm a 100µm), chegando a ser imperceptível a olho nu em algumas regiões. Já para agregados mais lamelares e com imperfeições, como o da amostra SD-75-FP, essa camada se mostra mais espessa (Figura 117), fazendo com que o agregado se torne mais esférico. Pode-se dizer, portanto, que a técnica de dopagem, nesta primeira análise simplista, porém importante, cumpre duas de suas premissas: a de alterar a forma do agregado e a de proporcionar o reforço onde for necessário.

A Figura 118, Figura 119, Figura 120 e Figura 121 mostram as amostras polidas e fraturadas, dos traços 1:5,5 e 1:3,5, escolhidas para análise.

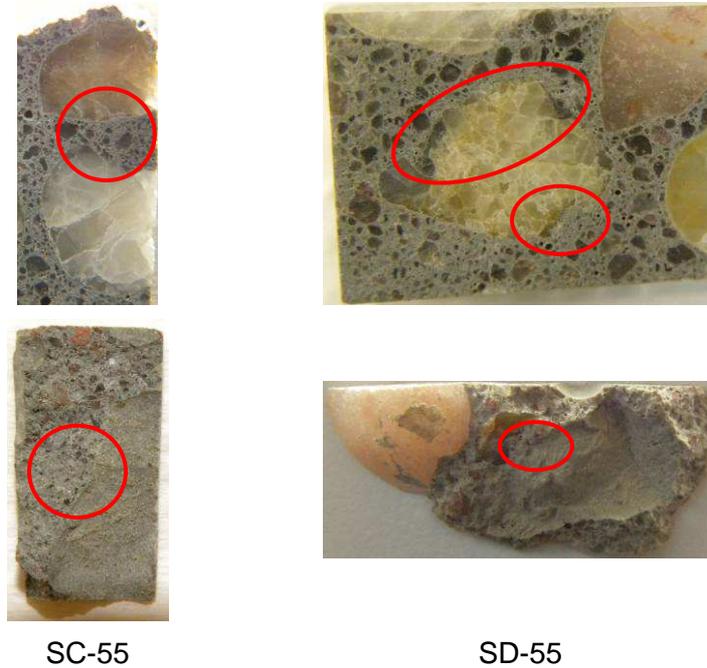


Figura 118: Amostras de concreto 1:5,5 com seixo rolado selecionadas para MEV.

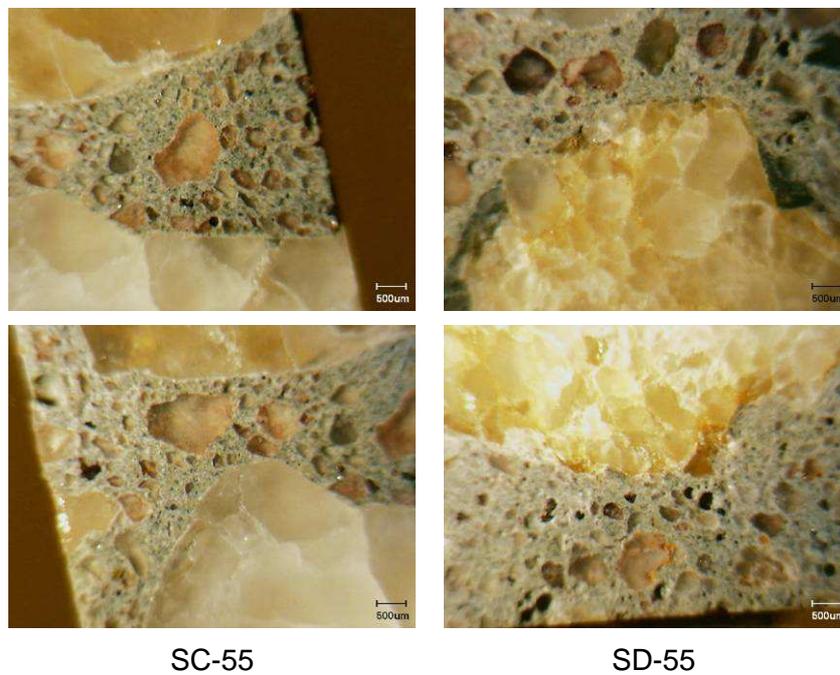
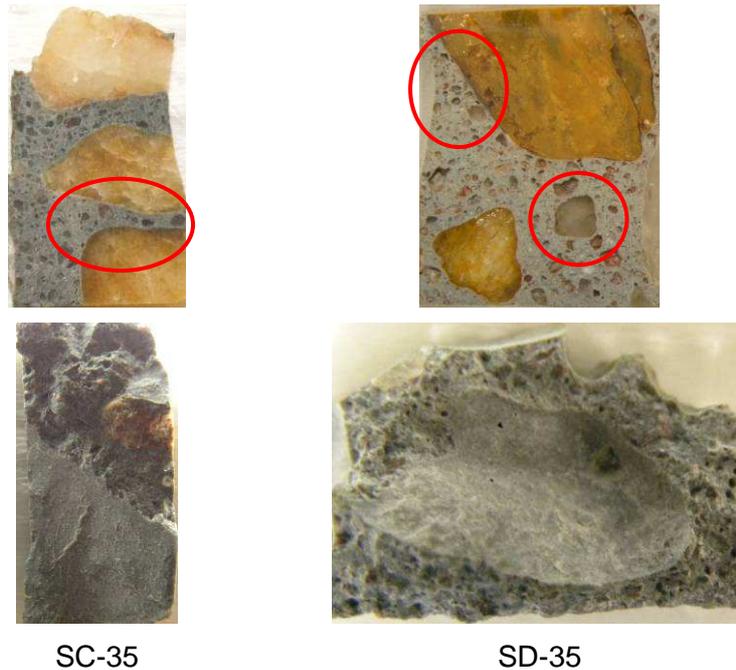
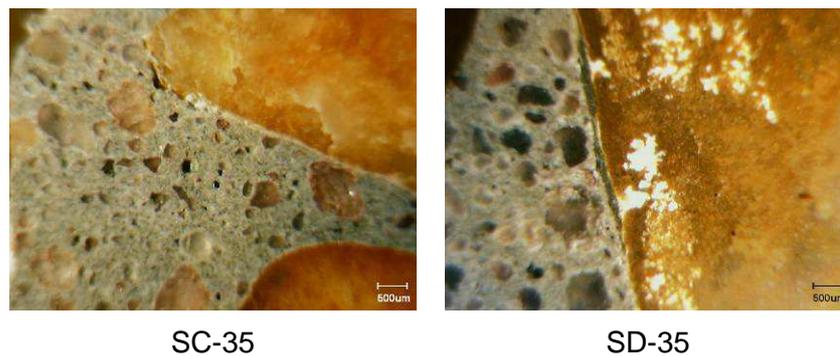


Figura 119: Imagens das amostras polidas da Figura 118 ampliadas 24x

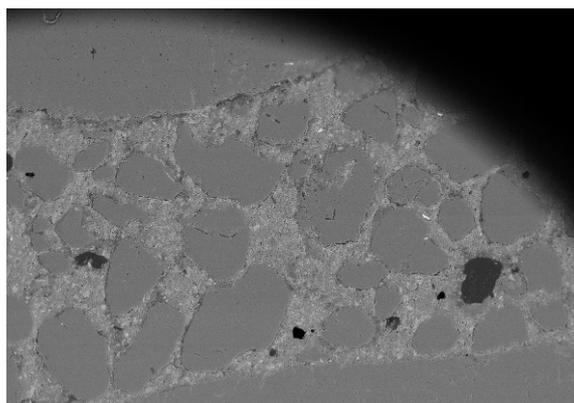


**Figura 120: Amostras de concreto 1:3,5 com seixo rolado selecionadas para MEV.**



**Figura 121: Imagens das amostras polidas da Figura 120 ampliadas 24x**

A fim de facilitar a comparação dos resultados, e conforme foi adotado para os resultados microestruturais referentes à laterita, são apresentadas a seguir, e seqüencialmente, as micrografias das amostras controle e dopada de cada traço de concreto estudado. Inicialmente serão vistas as micrografias obtidas de amostras polidas de concreto e na seqüência as obtidas de amostras fraturadas.

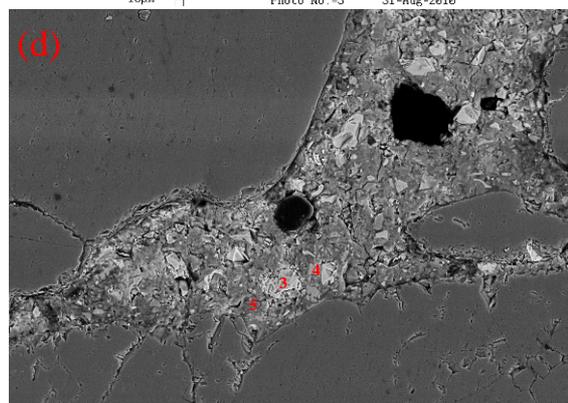
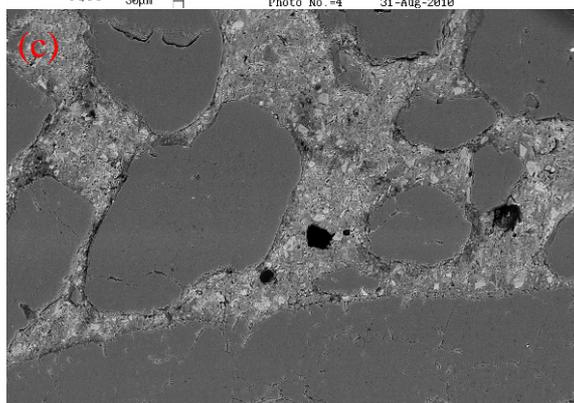
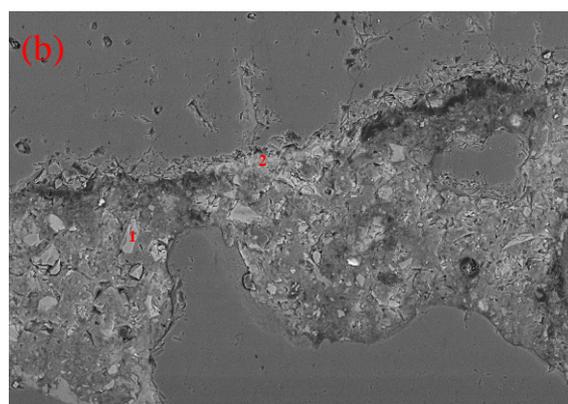
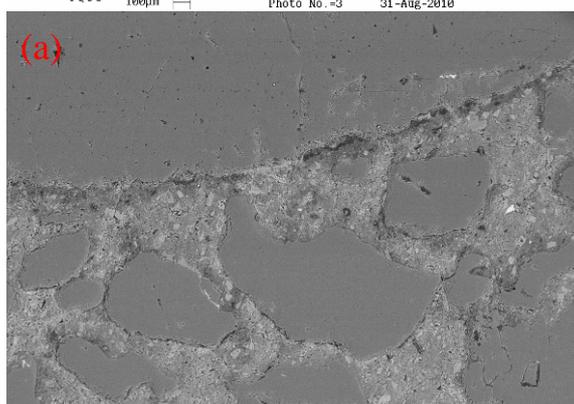


Relações das fases presentes nas Micrografias (b) e (d) da Figura 122 - Relações em %

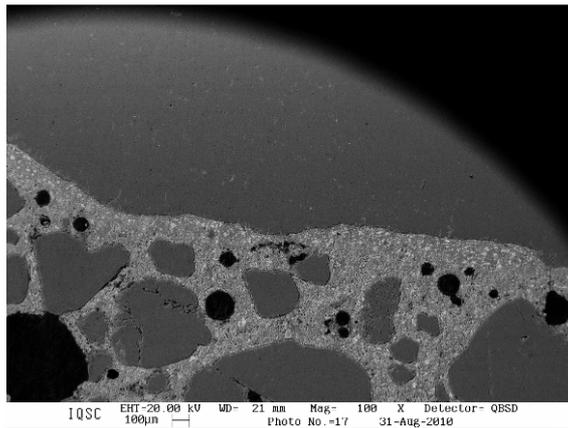
	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	A	2,19	0,01	2,12
2	CH	22,08	-	22,08
3	E	1,18	0,41	0,79
4	CH	37,34	-	37,34
5	C-S-H	1,56	0,18	1,23

obs.:

A - Anidro  
 CH - Ca(OH)<sub>2</sub>  
 C-S-H - Silicato de Cálcio Hidratado  
 E - Escória

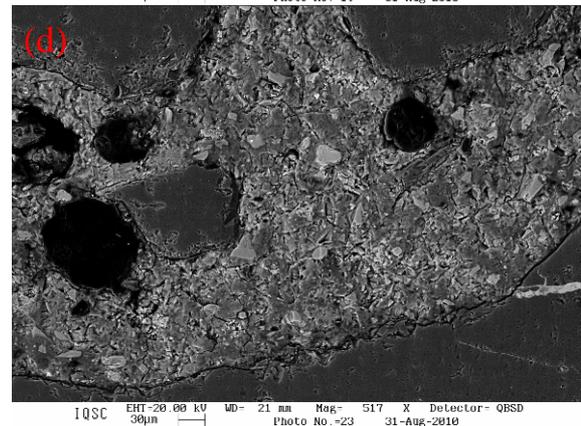
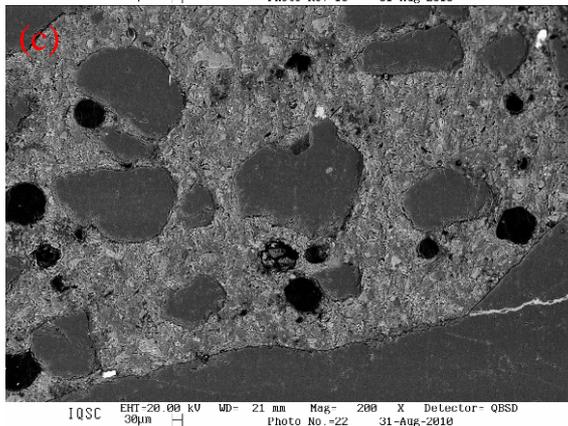
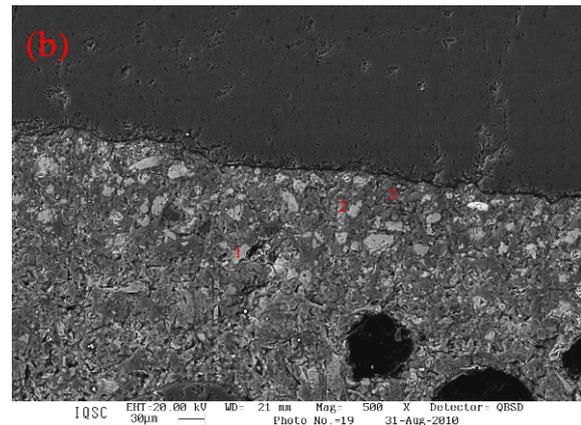
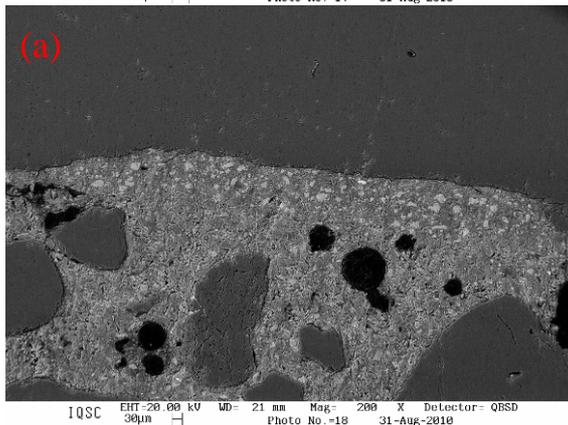


**Figura 122: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SC-75. (a) e (b): ZT abaixo do agregado; (c) e (d): ZT acima do agregado.**



Relações das fases presentes na Micrografia (b) da Figura 123 - Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	A	2,10	0,02	2,01
2	CH	24,73	-	24,73
3	C-S-H	1,75	0,03	1,66



**Figura 123: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-75-IP. (a) e (b): ZT abaixo do agregado; (c) e (d): ZT acima do agregado**

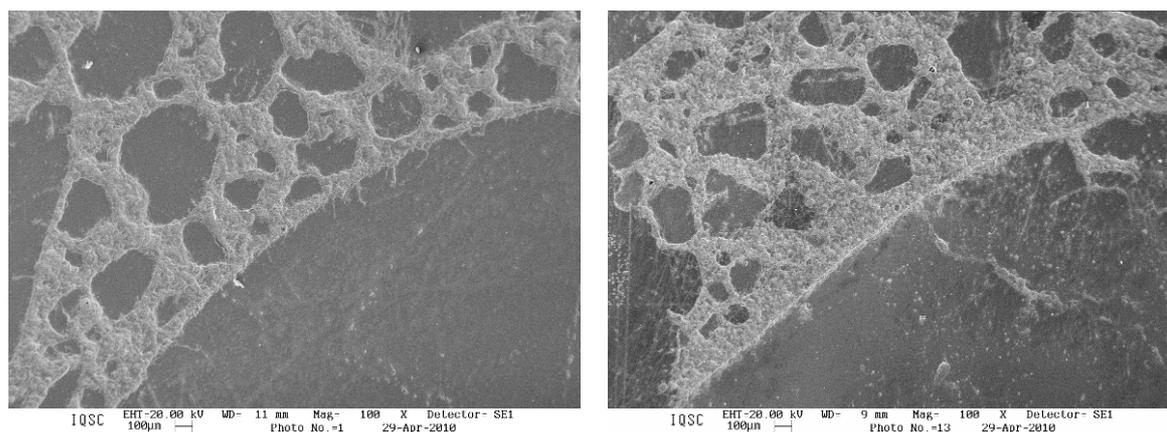
O conjunto de micrografias da Figura 122 e Figura 123 ilustra a alta porosidade dos concretos com alta relação a/c (0,65), sem adição de sílica ativa. A coloração preta representa os vazios existentes na pasta.

Avaliando o efeito da técnica de dopagem na zona de transição pasta/agregado, observa-se que no concreto controle SC-75 a coloração da pasta em contato com o agregado (micrografias da Figura 122) é mais escura, refletindo um maior número de vazios nesta região. Percebe-se que essa coloração escura em torno do seixo rolado praticamente

desaparece no caso do concreto dopado SD-75-IP (micrografias da Figura 123), demonstrando a eficiência da técnica no refinamento dos poros.

A camada de impregnação pode ser facilmente reconhecida nas micrografias da Figura 123 pela alta concentração de partículas anidras de cimento, representadas pelos pontos de coloração clara (branca). O desafio maior ao aplicar a técnica de dopagem no seixo rolado é garantir que a camada de impregnação permaneça aderida a ele, dada a baixa rugosidade superficial deste agregado. Nas micrografias (a) e (b) da Figura 123 está evidente a presença da calda de dopagem na região da ZT localizada abaixo do agregado graúdo. Na região acima do agregado (micrografias (c) e (d) desta figura) não é possível distinguir facilmente tal camada. Isto leva a refletir sobre a permanência ou não da impregnação, sendo prudente tirar qualquer conclusão a respeito disto somente após o estudo microestrutural dos demais traços de concreto.

As micrografias da Figura 124 referem-se às amostras controle e dopada do traço 1:7,5. As imagens obtidas com elétrons secundários ajudam a avaliar a permanência da camada de impregnação. É possível observar que os agregados miúdos da amostra dopada SD-75-IP estão mais afastados do agregado graúdo se comparados aos da amostra controle SC-75, ou seja, a espessura da camada em torno do seixo rolado é maior, dando mais um indício de que, para esse traço, a pasta de impregnação permaneceu aderida ao agregado.



**Figura 124: Micrografias (100x) para amostras de SC-75 (esq.) e traço SD-75-IP (dir.).**

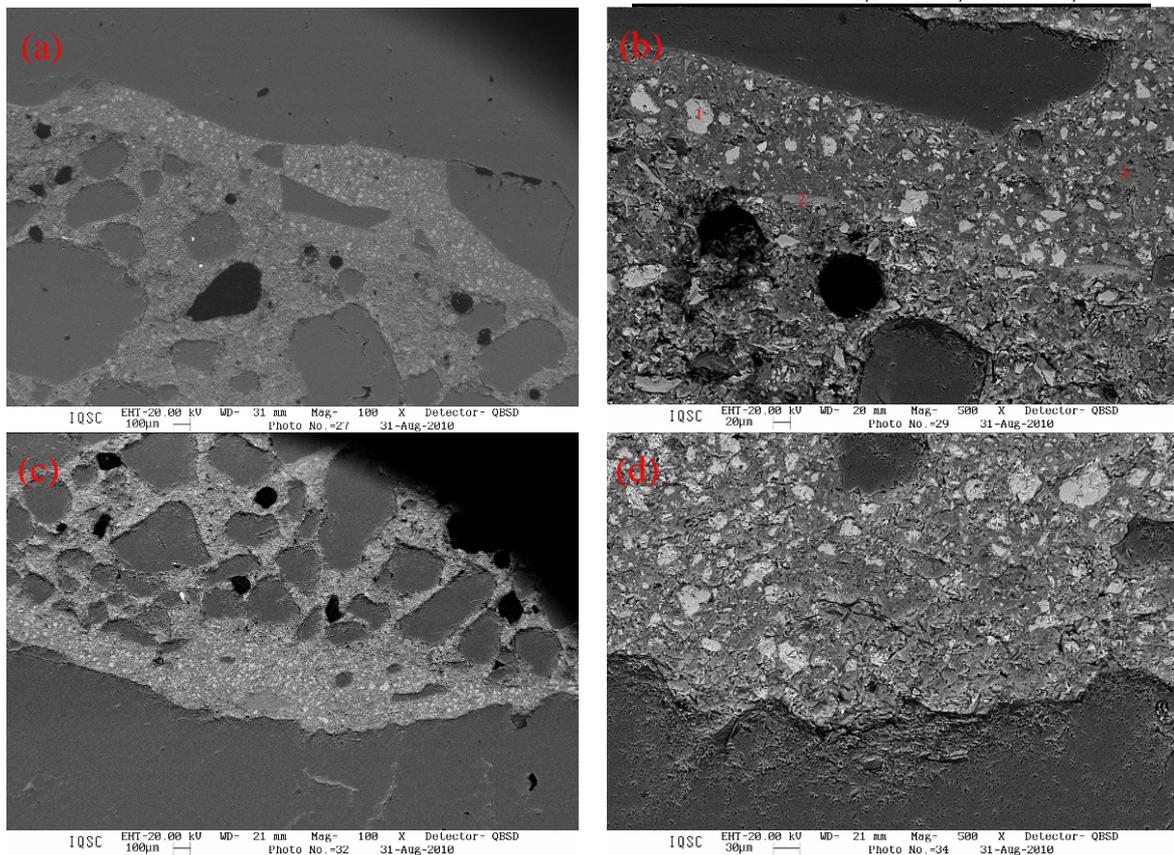
Uma vez melhorada a ZT pasta/agregado dos concretos dopados, se houver o reforço da matriz cimentícia, utilizando-se de artifícios da tecnologia do concreto, o desempenho do material como um todo será melhorado e corresponderá ao de um CAD. Isto foi comprovado nos traços lateríticos complementares, em que foi utilizada a técnica de

empacotamento de partículas, o uso de aditivo superplastificante e a incorporação da sílica ativa como artifícios para obtenção do reforço da matriz do concreto.

As micrografias da Figura 125 referem-se ao concreto SD-75-FP elaborado quando a calda de dopagem do agregado tinha completados 24 horas de hidratação. Nota-se que neste caso, também há refinamento da ZT calda de impregnação/agregado, assim como ocorreu com as amostras do traço SD-75-IP. Entretanto, ao avaliar a ligação da camada de impregnação com a pasta do concreto, observa-se uma camada de CH formada preferencialmente nesta região.

Fases presentes na Micrografia (b) da Figura 125 -  
Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	A	2,22	0,01	2,17
2	CH	57,19	-	57,09
3	C-S-H	1,71	0,06	1,56



**Figura 125: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-75-FP.  
(a) e (b): ZT abaixo do agregado; (c) e (d): ZT acima do agregado.**

Conforme já exposto, a zona de transição apresenta elevada relação a/c decorrente do filme de água que se forma em torno do agregado graúdo. Além disso, os maiores espaços nessa região permitem a formação de grandes cristais de CH com seu eixo C

orientado perpendicularmente ao agregado, o que cria planos preferenciais de ruptura. A falha na aderência entre a pasta e o agregado relaciona-se, principalmente, aos grandes cristais formados, com superfície específica menor, o que diminui a força de adesão (forças de Van der Waals). Na micrografia (b) da Figura 125 pode ser vista uma concentração de CH na interface da calda de alto desempenho com a pasta do concreto, podendo-se concluir que a dopagem com 24 horas acabou comprometendo esta ligação. Chama-se atenção para o fato do depósito de CH ser evidente na ZT abaixo do agregado, devido ao efeito de exsudação interna.

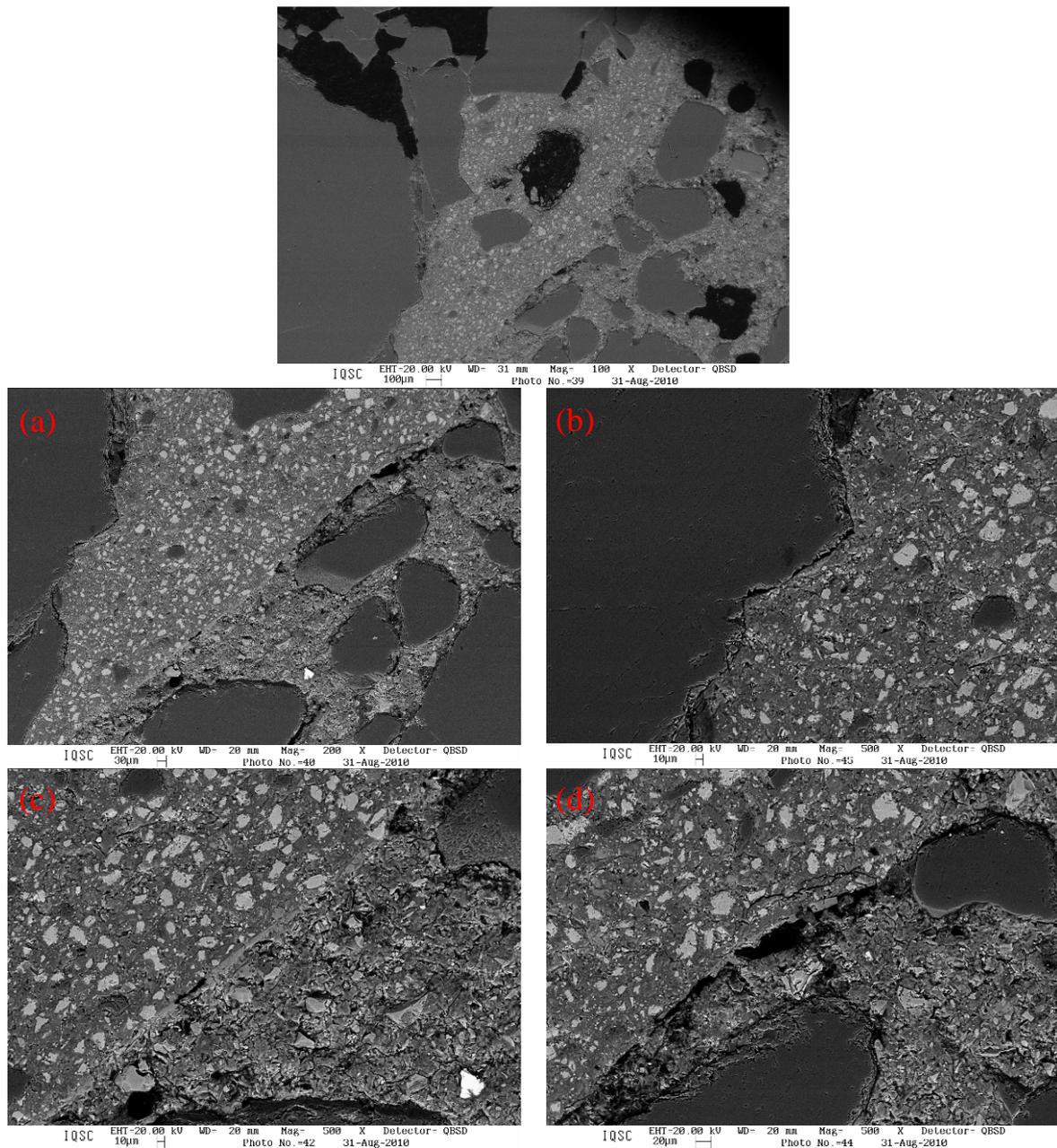
O acúmulo de CH na ZT acabou não prejudicando o desempenho mecânico do concreto SD-75-FP, conforme visto nos resultados mecânicos apresentados na seção 5.6.1. (Resistência à compressão), porque a interface entre o agregado e a calda de impregnação foi melhorada pela dopagem, conforme visto nas micrografias (a) e (c) da Figura 125. Esta melhoria é proveniente da baixa relação  $a/agl$  da calda de dopagem e das reações pozolânicas ocorridas entre o hidróxido de cálcio e a sílica ativa, resultando em uma zona de transição de menor espessura e mais densa, com pequenos vazios e em menor quantidade. Conforme será visto nas amostras fraturadas, a ZT dos concretos dopados apresentou pequenos cristais de CH não orientados, refletindo em densificação desta região.

Para melhor avaliar a ligação calda de impregnação/pasta do concreto após aplicação da dopagem com 24 horas foram analisadas as micrografias da Figura 126. As micrografias (a), (c) e (d) desta figura mostram e confirmam a deficiência na interface da camada de dopagem com a pasta do concreto. Em algumas regiões dessa interface, a deficiência ocorre pela falta de produtos hidratados do cimento, com falhas e descontinuidades de tamanho considerável (acima de 20 micrometros de espessura) e em outras regiões a deficiência provém do acúmulo de CH na interface, conforme verificado; produto reconhecidamente mais frágil e poroso e que prejudica a ligação.

É interessante perceber que pelo fato da camada de impregnação ser de alto desempenho, com características muito superiores as da pasta do concreto, a deficiência ocorre na ZT camada de impregnação/pasta do concreto, mostrando que a ZT na interface com o agregado foi reforçada.

Na micrografia (b) da Figura 126 pode ser vista a boa ligação do agregado com a camada de impregnação, confirmando o reforço desta região após a dopagem e a qualidade na ZT. Neste caso específico, o agregado tratado passa a ser o conjunto dele próprio mais a camada de impregnação, e isto acaba influenciando na resistência à tração e módulo de elasticidade do concreto.

Considerando a presença de CH verificada nas micrografias dos concretos SD-75-FP e o fato do ensaio de microscopia ser realizado aos 28 dias de idade, sendo que nesta idade os resultados de resistência à compressão dos traços dopados foram muito semelhantes, independente do procedimento de dopagem utilizado (início de pega ou com 24 horas de impregnação), optou-se pela dopagem no início de pega, que foi aplicada aos traços mais ricos 1:3,5 e 1:5,5. Além disso, também se levou em conta a agilidade no processo de execução da técnica.



**Figura 126: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-75-FP.**

O conjunto de micrografias da Figura 127, Figura 128, Figura 129 e Figura 130 mostra que à medida que a relação a/c dos traços de concreto diminui, mesmo sem haver adição de sílica ativa, a porosidade também é reduzida. Portanto, observam-se vazios em ordem crescente nas pastas dos traços 1:3,5, 1:5,5 e 1:7,5. Conforme o traço é enriquecido, os vazios, além de diminuírem, encontram-se mais dispersos, traduzindo em um refinamento da pasta do concreto.

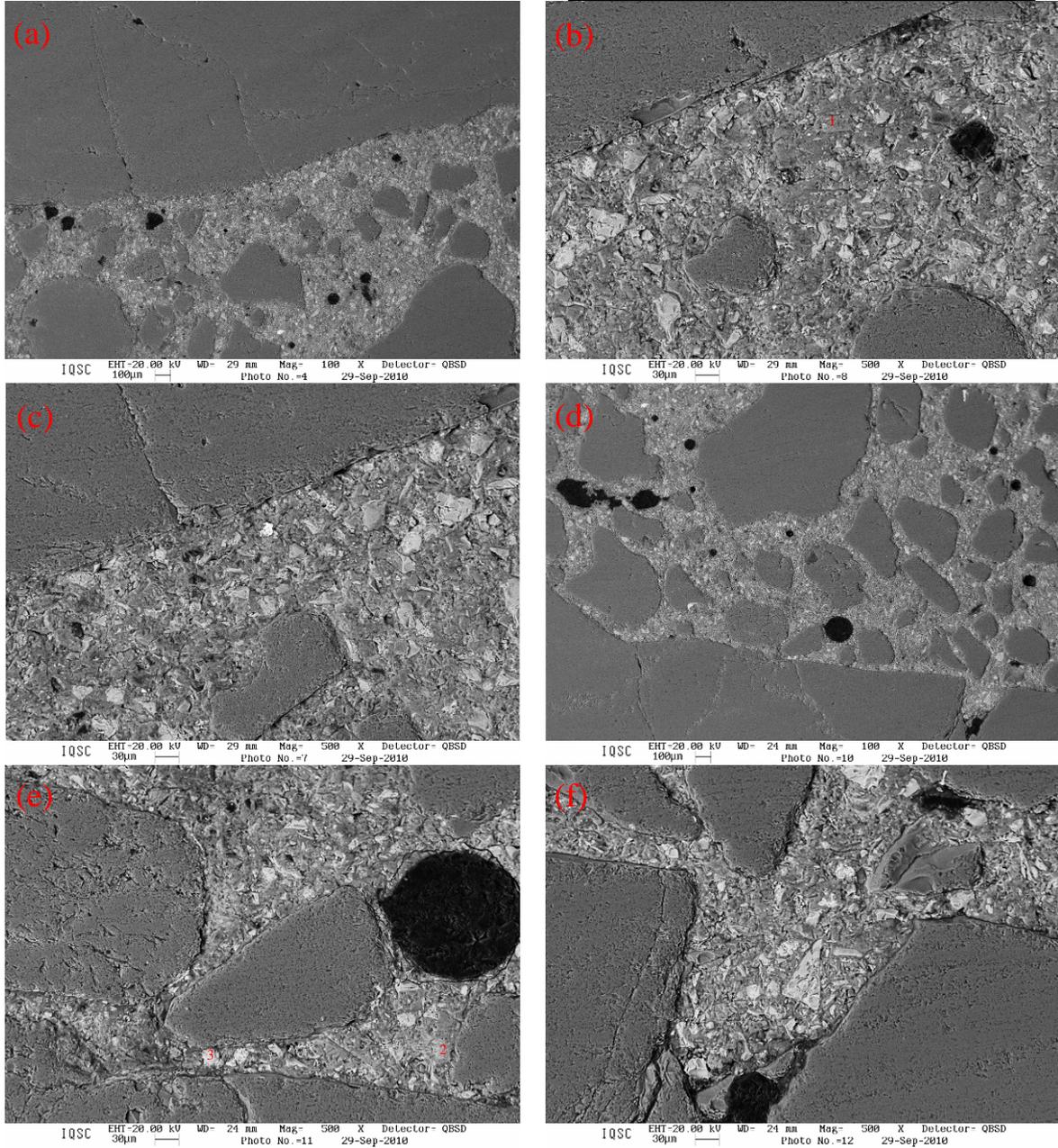
De maneira geral, em algumas micrografias das amostras dopadas, principalmente nos traços mais ricos (SD-35 e SD-55), nota-se que a camada de impregnação não parece ter permanecido aderida em todo o contorno do agregado, a exemplo da Figura 128 e Figura 130 sugerindo que a aplicação da técnica de dopagem para o seixo rolado pode não ter sido tão eficaz quanto se esperava.

A suspeita da eficácia da adesão da calda de alto desempenho ao seixo rolado não compromete, em hipótese alguma, sua metodologia de aplicação e/ou sua dosagem, já que para outros agregados o comportamento da dopagem de materiais pode ser completamente diferente, dadas as características específicas de cada inerte, conforme verificado para as lateritas.

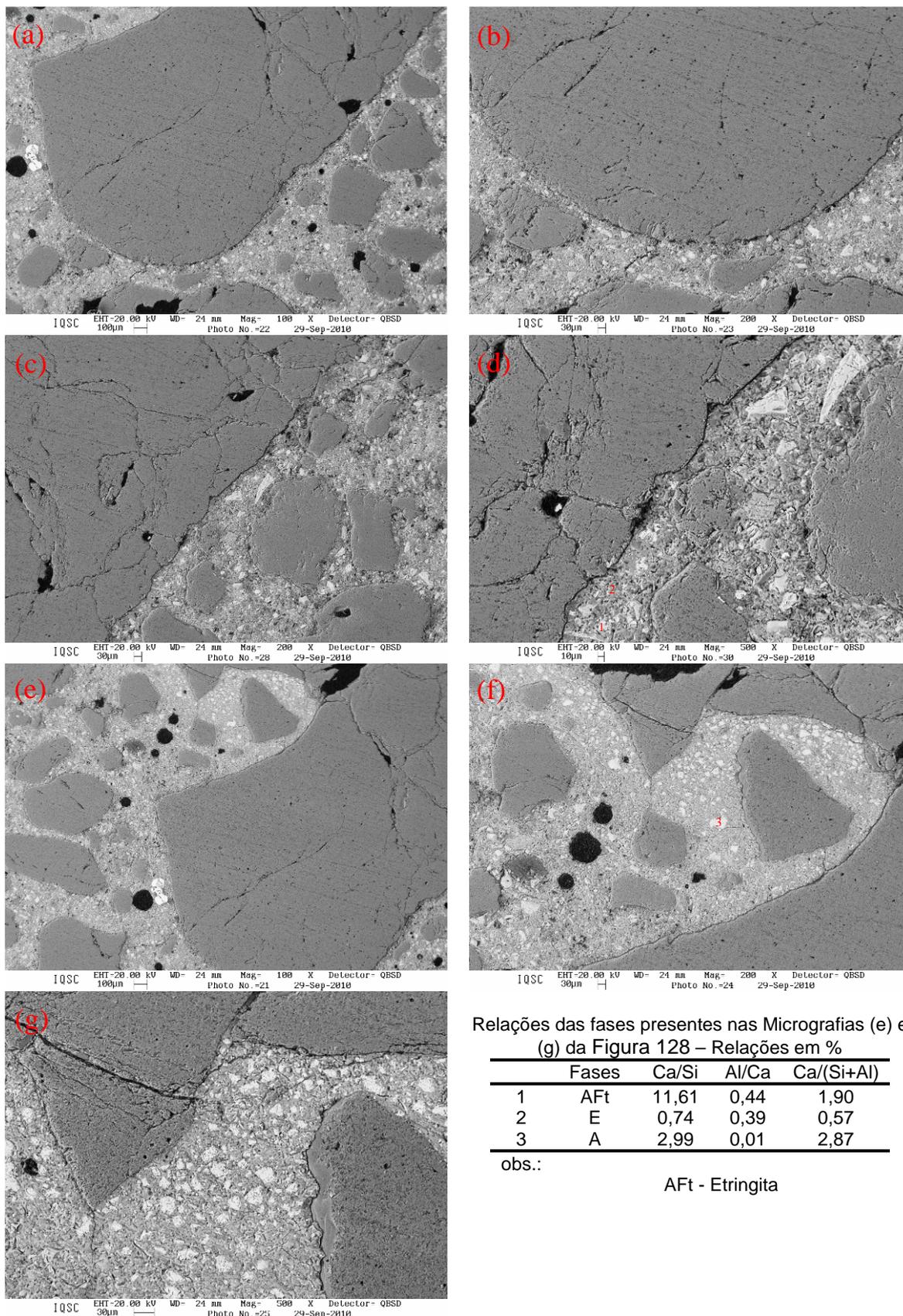
Avaliando o efeito da técnica de dopagem nos traços 1:5,5, a partir do conjunto de micrografias da Figura 127 e Figura 128, observa-se que houve refinamento dos poros e aumento da compacidade na região da ZT pasta/agregado das amostras dopadas. Nas micrografias da Figura 128, correspondentes ao traço SD-55, foi observada, a partir da realização de “dot mapping”, a presença de magnésio que é atribuído a AFt. O magnésio também foi detectado nas amostras fraturadas deste traço (micrografia (d) da Figura 146).

Relações das fases presentes nas Micrografias (b) e (e) da Figura 127 – Relações em %

	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	CH	11,92	-	11,92
2	CH	71,76	-	71,76
3	A	2,03	0,01	1,99



**Figura 127: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SC-55. (a), (b) e (c): ZT abaixo do agregado; (d), (e) e (f): ZT acima do agregado.**



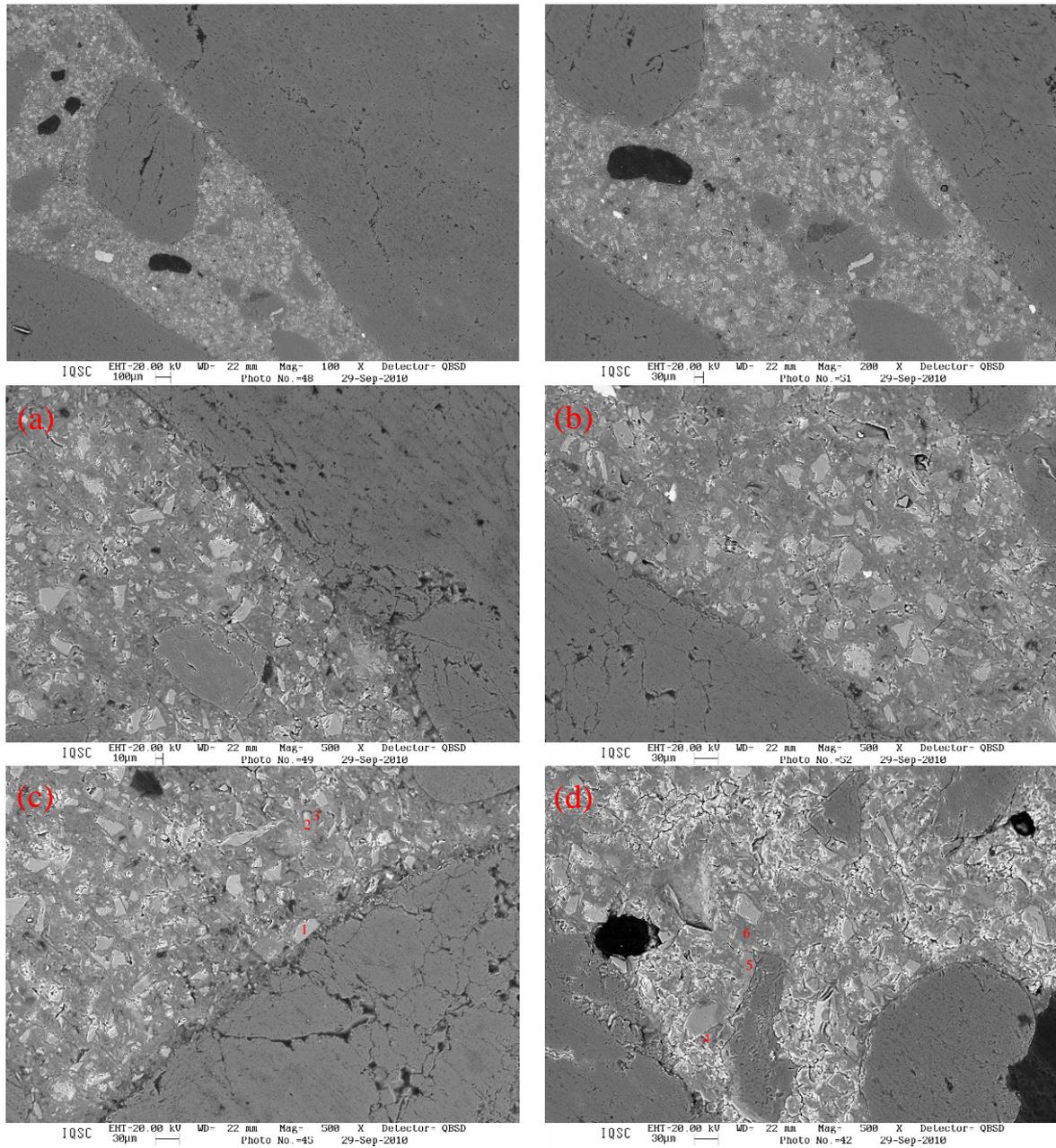
Relações das fases presentes nas Micrografias (e) e (g) da Figura 128 – Relações em %

Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1 AFt	11,61	0,44	1,90
2 E	0,74	0,39	0,57
3 A	2,99	0,01	2,87

obs.:

AFt - Etringita

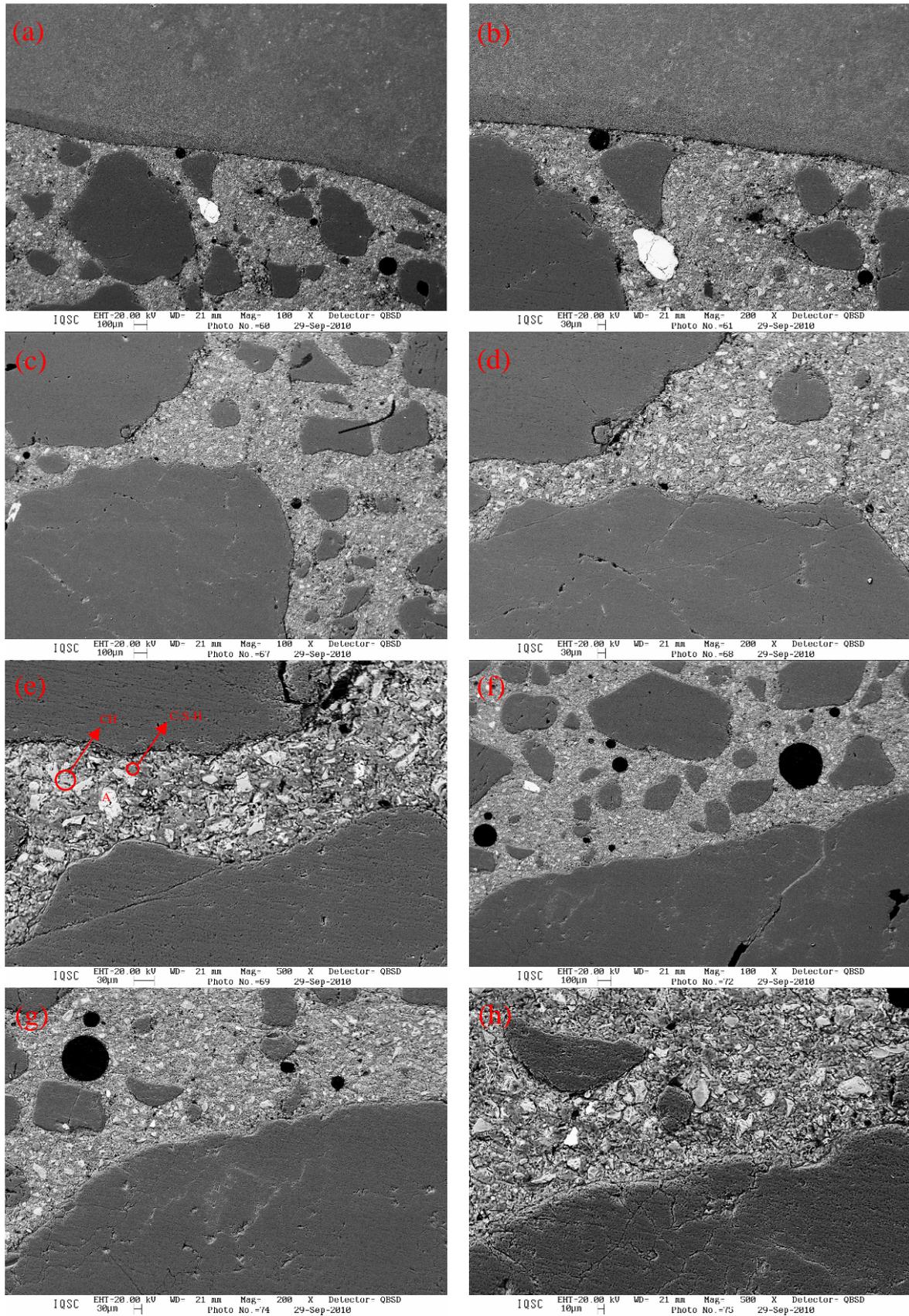
**Figura 128: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-55. (a), (b), (c) e (d): ZT abaixo do agregado; (e), (f) e (g): ZT acima do agregado.**



Relações das fases presentes nas Micrografias (c) e (d) da Figura 129 – Relações em %

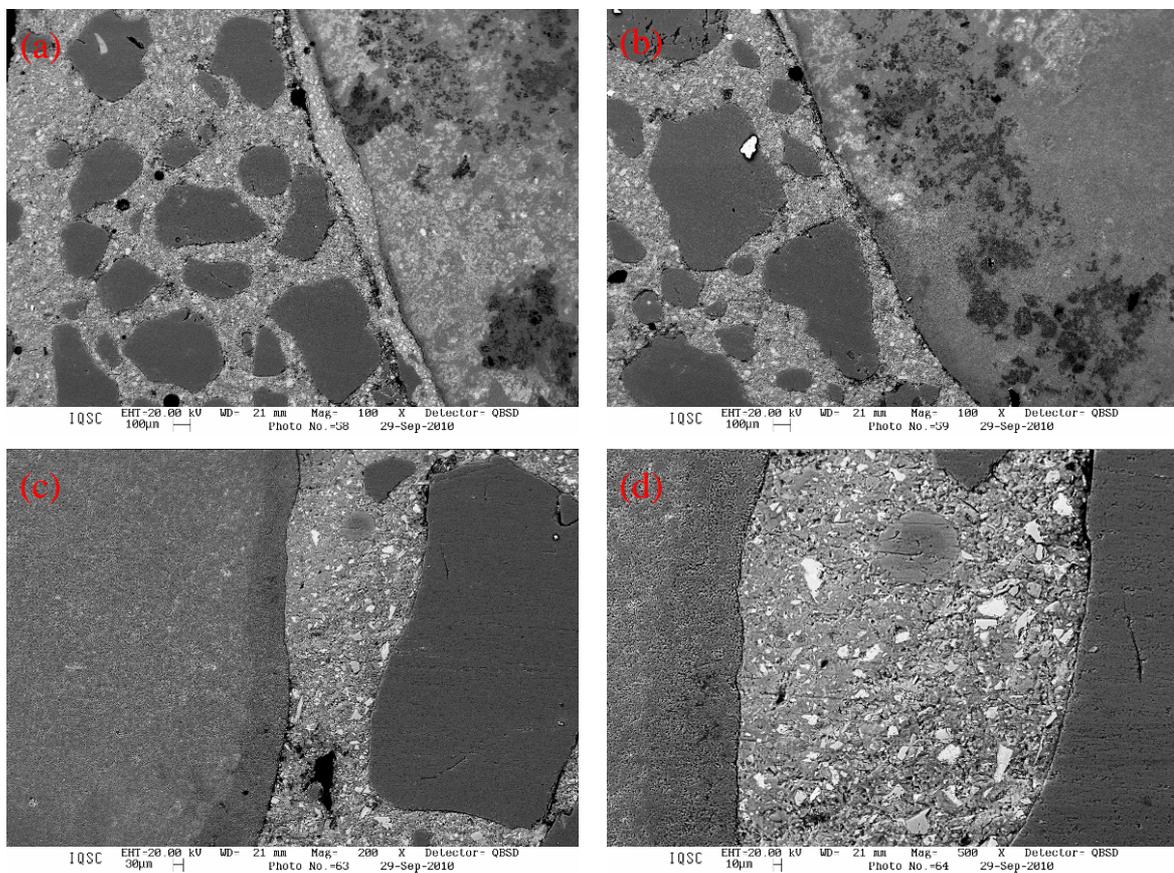
	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	E	1,34	0,25	1,01
2	A	2,73	0,02	2,61
3	C-S-H	1,66	0,03	1,60
4	E	1,09	0,31	0,81
5	CH	68,31	-	68,31
6	C-S-H	2,01	0,17	1,49

**Figura 129: Micrografias (100x até 3000x) para amostra polida de SC-35. (a): ZT abaixo do agregado; (b), (c) e (d): ZT acima do agregado.**



**Figura 130: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-35. (a) e (b): ZT abaixo do agregado; (c), (d) (e), (f) (g) e (h): ZT acima do agregado.**

A camada de dopagem do traço SD-35 não é vista facilmente nas micrografias da Figura 130, chegando a dar indícios de que não está presente, devido à pequena diferença apresentada pela calda de dopagem e pela pasta do concreto quanto aos produtos de hidratação, já que ambas foram confeccionadas com quantidade de água e consumo de cimento semelhantes. Desta forma, a diferença entre a quantidade de partículas de cimento anidras da calda de alto desempenho e da pasta do concreto, que para os traços mais pobres era visível, é sutil em traços mais ricos. Após observação de outras micrografias deste mesmo traço 1:3,5, apresentadas na Figura 131, é possível confirmar a existência da calda de impregnação.



**Figura 131: Micrografias (100x até 500x) para amostra polida de SD-35.**

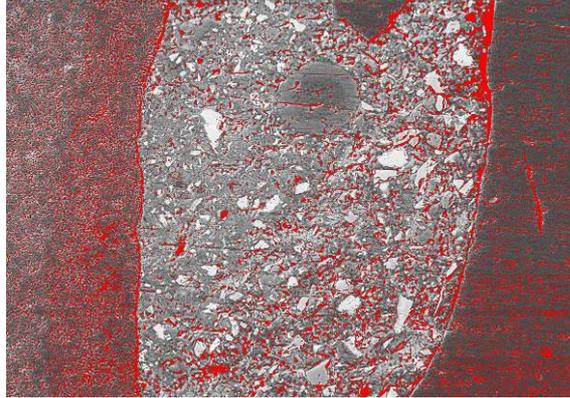
Nas micrografias (a) e (b) da Figura 131, nota-se falha entre a camada de impregnação e a pasta do concreto. Acredita-se que na amostra analisada o seixo rolado não estava aderido à pasta do concreto, existindo uma descontinuidade imperceptível a olho nu. Durante as etapas de preparação das amostras deste traço (SD-35), houve descolamento do agregado em várias delas. Uma das possibilidades de ruptura em torno do agregado está no próprio manuseio da amostra ou ainda por decorrência de choque térmico

após sua retirada da estufa, terminado o processo de secagem. Porém, o fato de existir material dentro da descontinuidade gera dúvida quanto a tal hipótese. Caso o material ali depositado seja oriundo do processo de lixamento da amostra, essa dúvida é sanada; caso contrário, não. Se for admitida a hipótese de que todas as amostras foram preparadas cuidadosamente e, portanto, o agregado não se descolou da pasta, então é possível que a camada de impregnação e a pasta do concreto não tenham se ligado e, portanto, as adesões física e química ficaram comprometidas; algo parecido com a dopagem em final de pega aplicada ao concreto SD-75-FP. Associada aos resultados mecânicos, a hipótese mais coerente é a da ocorrência de choque térmico, uma vez que o desempenho mecânico do concreto SD-35 dopado não foi comprometido.

As micrografias (c) e (d) da Figura 131 mostram claramente a diferença entre a região onde a camada de impregnação permaneceu aderida ao agregado e aquela sem a calda de dopagem. Analisando os produtos de hidratação, pode-se ver que na calda de alto desempenho há menor quantidade de cimento anidro se comparada à pasta do concreto, e o tamanho das partículas anidras também é menor. Isto ocorre principalmente porque a calda de alto desempenho possui sílica ativa, que gera um grande número de nucleações locais para a precipitação dos produtos da hidratação.

Em concretos de elevado desempenho e de alta resistência os grandes grãos de cimento não hidratados estão sempre presentes na pasta de cimento endurecida. O mesmo ocorre para a calda de alto desempenho. Desde que a água utilizada na mistura seja insuficiente para molhar todos os grãos de cimentos e a matriz permaneça tão impenetrável que a água do exterior não possa penetrá-lo, os grãos permanecerão sem hidratar-se. Analisando as micrografias dos traços dopados (Figura 123, Figura 124, Figura 125, Figura 127, Figura 129 e Figura 130), percebe-se uma distribuição de partículas de vários tamanhos na camada de impregnação, inclusive com dimensões que chegam a 30 $\mu$ m, as quais dificilmente irão hidratar-se completamente. Por outro lado, conforme dados da literatura, nos cimentos de alta resistência inicial há confirmação do desaparecimento de partículas menores do sistema.

Utilizando recursos de processamento de imagem, estão destacadas na cor vermelha as áreas de poros da Figura 132, ficando claro que a quantidade de vazios da calda de alto desempenho é bem menor que os vazios da matriz do concreto, e que neste caso já é uma matriz melhorada por ser referente à matriz do traço 1:3,5.



**Figura 132: Micrografia (500x) de amostra polida de SD-35, destacando a porosidade.**

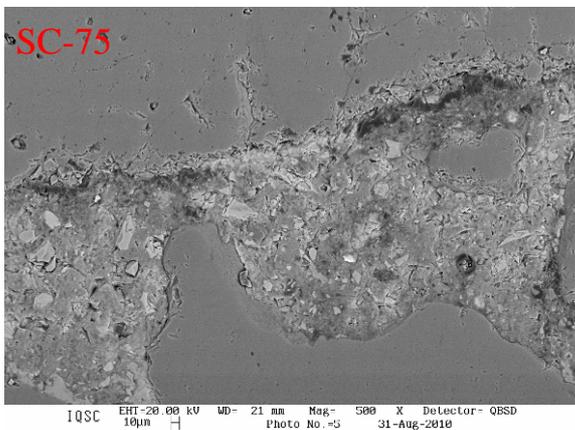
As variações nas taxas Ca/Si de um ponto para outro dentro da matriz de C-SH da pasta cimento Portland e da calda de impregnação refletem a variável composição do C-S-H observada nas micrografias da Figura 129. Destaca-se também o fato de que, com a adição da SA, as relações Ca/Si e Ca/(Si+Al) são alteradas e diminuem (um fato mencionado na literatura especializada), uma vez que o C-S-H produzido na hidratação dos aglomerantes hidráulicos em presença de adições é diferenciado pela relação CaO/SiO<sub>2</sub> segundo a sua origem.

Nas amostras de concreto com seixo rolado não houve diminuição das relações entre os elementos Ca e Si nas regiões próximas à zona de transição pasta/agregado, conforme verificado nas amostras de concreto laterítico, confirmando a contribuição do alumínio e ferro presentes somente na composição da laterita.

Algumas micrografias representativas das amostras controle e dopada são apresentadas na magnificação 500x, lado a lado, respectivamente à esquerda e à direita da figura para facilitar a comparação do estudo semi-quantitativo das fases presentes em cada amostra. Conforme adotado nos concretos lateríticos, a estimativa da porcentagem foi feita com base nas quantidades das diferentes tonalidades de cinza da amostra, utilizando-se recursos de processamento de imagem para discretizar cada tom. Conforme foi dito, este é um cálculo aproximado e que fornece indícios do comportamento dos concretos. Levou-se em conta, evidentemente, a lógica da evolução da hidratação para verificar a coerência entre os valores encontrados.

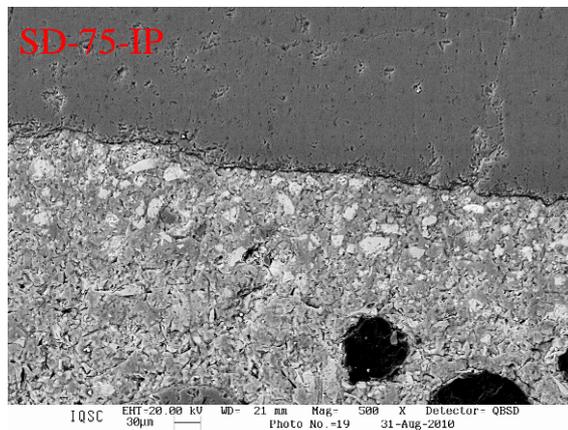
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço SC-75

Fases	%
A	7,9
CH	39,4
OPH	40,6
P	12,1



Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço SD-75-IP

Fases	%
A	15,8
CH	27,1
OPH	43,8
P	13,3



Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço SD-75-FP

Fases	%
A	14,5
CH	26,8
OPH	44,6
P	14,1

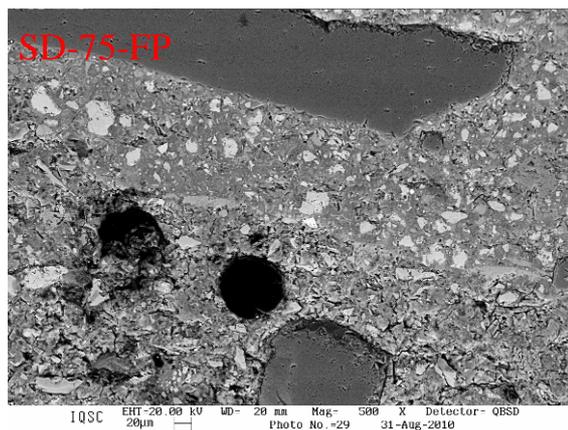
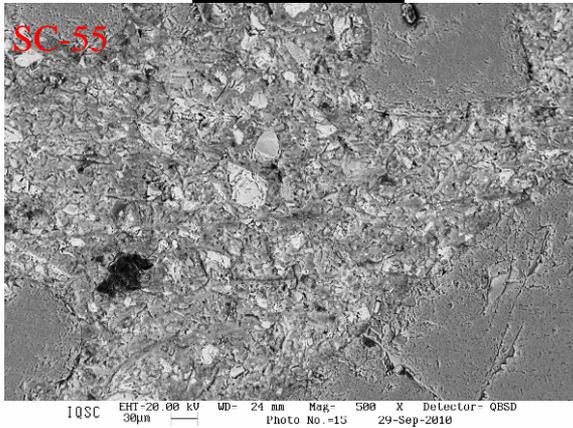


Figura 133: Estudo semi-quantitativo das fases presentes nos traços 1:7,5.

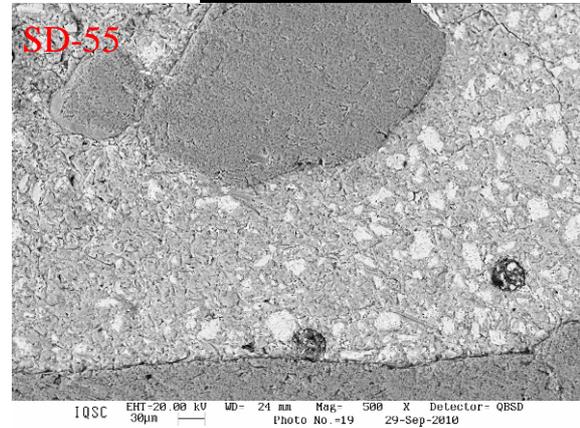
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço SC-55

Fases	%
A	15,5
CH	35,4
OPH	40,3
P	8,8



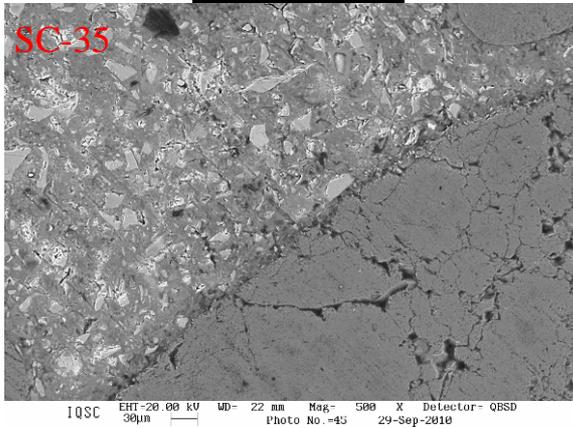
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço SD-55

Fases	%
A	17,6
CH	29,0
OPH	48,1
P	5,3



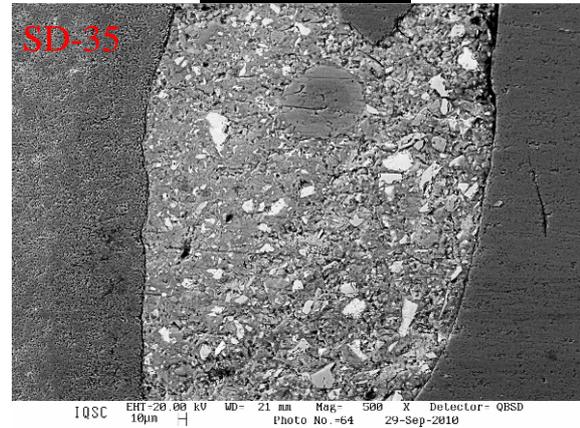
Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço SC-35

Fases	%
A	16,6
CH	27,0
OPH	52,7
P	3,7



Porcentagens das fases presentes na micrografia do traço SD-35

Fases	%
A	18,4
CH	16,3
OPH	57,8
P	7,5



**Figura 134: Estudo semi-quantitativo fases presentes nos traços 1:5,5 e 1:3,5.**

O estudo semi-quantitativo mostrado na Figura 133 e Figura 134 confirma a existência de maior porcentagem da fase anidra (A) nos concretos dopados, chegando a uma diferença de 50% para o traço 1:7,5, cuja matriz apresenta água em excesso; portanto, bem menos cimento anidro. A diferença torna-se menor no caso dos traços mais ricos (14% no traço 1:5,5 e 11% no traço 1:3,5).

A porcentagem de poros nas amostras dopadas do traço 1:7,5 aumentou se comparada a do traço controle, e a explicação para isto está na existência dos macroporos

(poros maiores que  $40\mu\text{m}$  vistos nas micrografias dopadas), que entraram no cálculo da porcentagem desta fase. Portanto, seria errado associar tal informação com a porosidade desses traços. Mesmo porque, na semiquantificação para poros, feita por MEV, existe a dificuldade em distinguir os microporos, dentro das estruturas do C-S-H. Com isso, na fronteira entre os tons de cinza nos histogramas correspondentes aos poros e a outros produtos hidratados (OPH) (maioria C-S-H) deve-se admitir uma sobreposição, que implica em variações nos cálculos para quantificar cada fase. Essa dificuldade é consistente com dados da literatura (SCRIVENER, 1997).

Para Melo (2000), a porosidade obtida por MEV é sempre inferior à obtida por porosimetria por intrusão de mercúrio, associada justamente à dificuldade de semiquantificação. O autor afirma também que existe uma boa correlação em todas as idades avaliadas com relação aos dados de OPH e CH obtidos por termogravimetria e MEV.

A análise total do que é considerado C-S-H e outras fases de produtos hidratados (OPH) aumentam com a evolução da idade e diminui com o aumento da relação água/aglomerante (SILVA, 2000). As micrografias presentes na Figura 135 e Figura 136 comprovam a diminuição com o aumento da relação  $a/agl$ , sendo que para os concretos de traço 1:3,5 com menor quantidade de água, maior foi a porcentagem da fase OPH encontrada.

O incremento da fase OPH foi ainda maior para os concretos executados com emprego da técnica de dopagem dos materiais, independente do traço. Contribuindo também para o desempenho dos concretos dopados, observa-se a diminuição da quantidade de CH nestas misturas. A relação de aumento e diminuição entre essas fases ocorre devido ao uso da sílica ativa e do superplastificante na calda de impregnação.

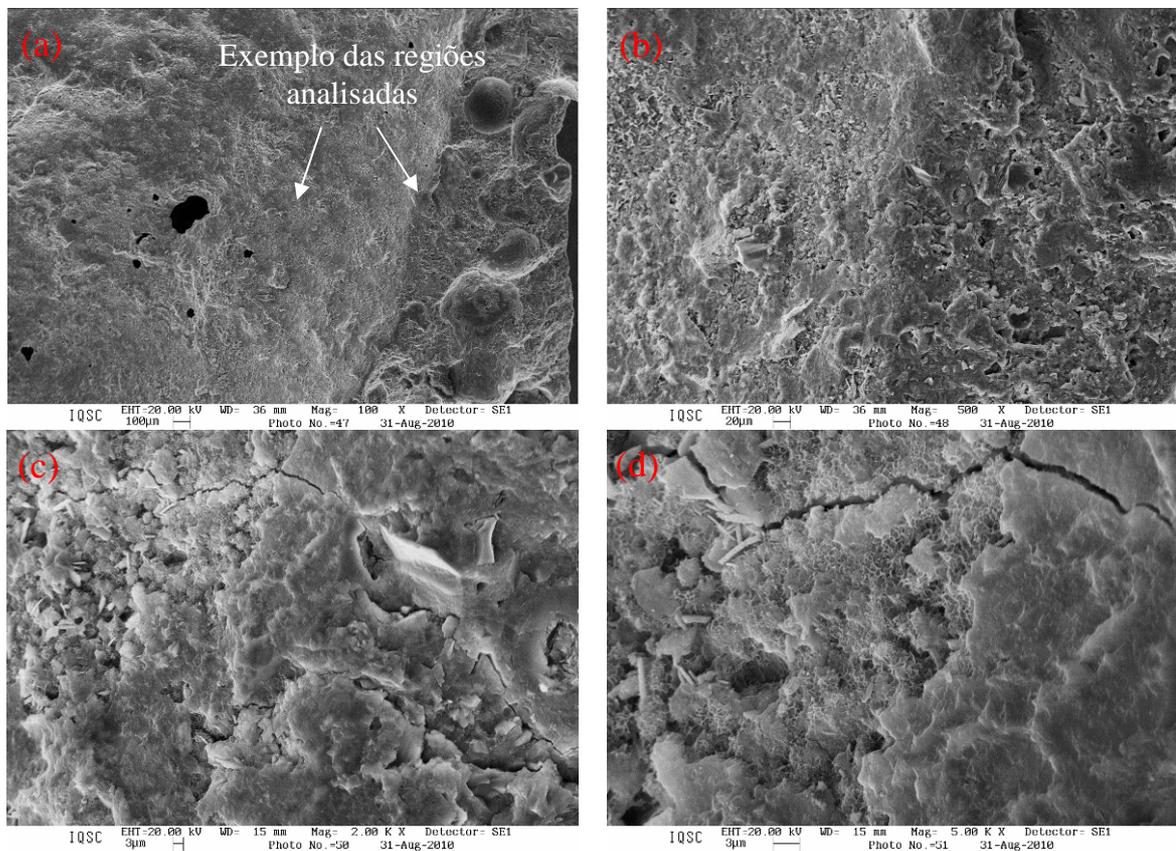
O emprego da sílica ativa reduz extremamente a formação de CH. Esse fator favorece também a ausência de zona de transição comprimindo cristais de CH e ajudando na formação de uma ligação pasta/agregado muito mais forte. Observa-se que as amostras contendo SA apresentam uma textura bem mais homogênea e refinada dos grãos, conforme será visto micrografias das amostras fraturadas, explicada pelo efeito de dispersão e nucleação que a sílica ativa promove na matriz, tornando-a mais compacta.

Embora o SP pareça também afetar nas quantidades de produtos hidratados (GU e colaboradores, 1994), verificando-se que pastas com SP possuem menores quantidades de C-S-H na superfície das partículas de cimento não-hidratadas e grandes quantidades de CH cobrindo estas superfícies, comparadas com as pastas de controle, não foi verificada tal alteração nos concretos estudados; ao contrário disso, houve aumento da fase OPH para os concretos dopados com calda contendo teor de 0,8% de superplastificante.

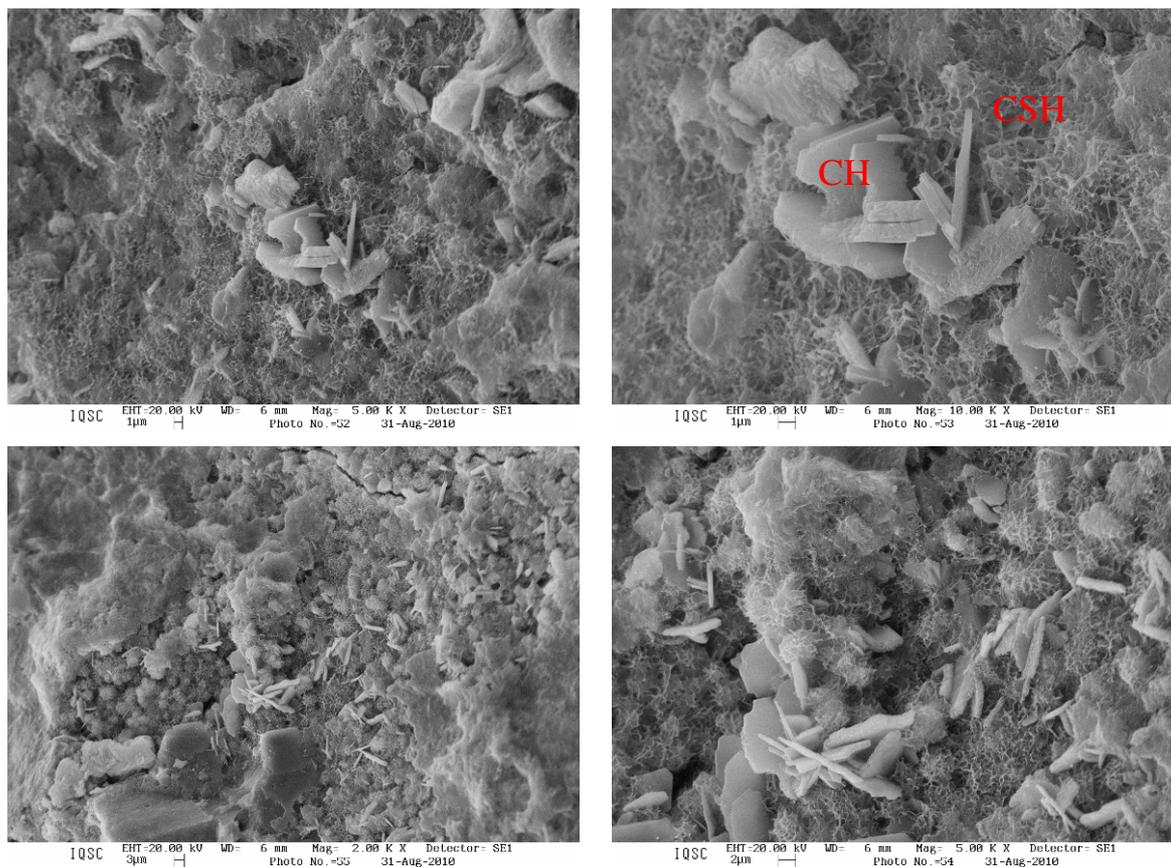
A partir das micrografias das amostras fraturadas dos concretos controles e dopados foram observadas a morfologia e as diferenças entre os produtos de hidratação existentes. Nessas imagens, teve-se interesse em analisar a pasta da região onde o agregado graúdo foi retirado (local onde existia o seixo rolado) e a região de transição entre a pasta do concreto e a pasta onde antes estava o agregado.

Seguindo a mesma metodologia utilizada nas amostras fraturadas de laterita, na Figura 135 são mostradas as regiões analisadas. À esquerda da micrografia (a) desta figura é mostrada a pasta onde antes estava o agregado, ou seja, a pasta da região onde o agregado foi retirado, e à direita desta micrografia, a pasta do concreto. As observações ocorreram no centro da região à esquerda e no limite dessas duas pastas, conforme indicado pelas setas

A partir de amostras fraturadas podem ser reconhecidos os dois produtos hidratados em maior quantidade no sistema de pasta endurecida de cimento Portland (C-S-H e CH). O CH tem tendência a formar grandes cristais (prismas hexagonais) que variam de formas não definidas até pilhas de placas geometricamente bem definidas. Já o C-S-H, exibe uma morfologia que varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino.



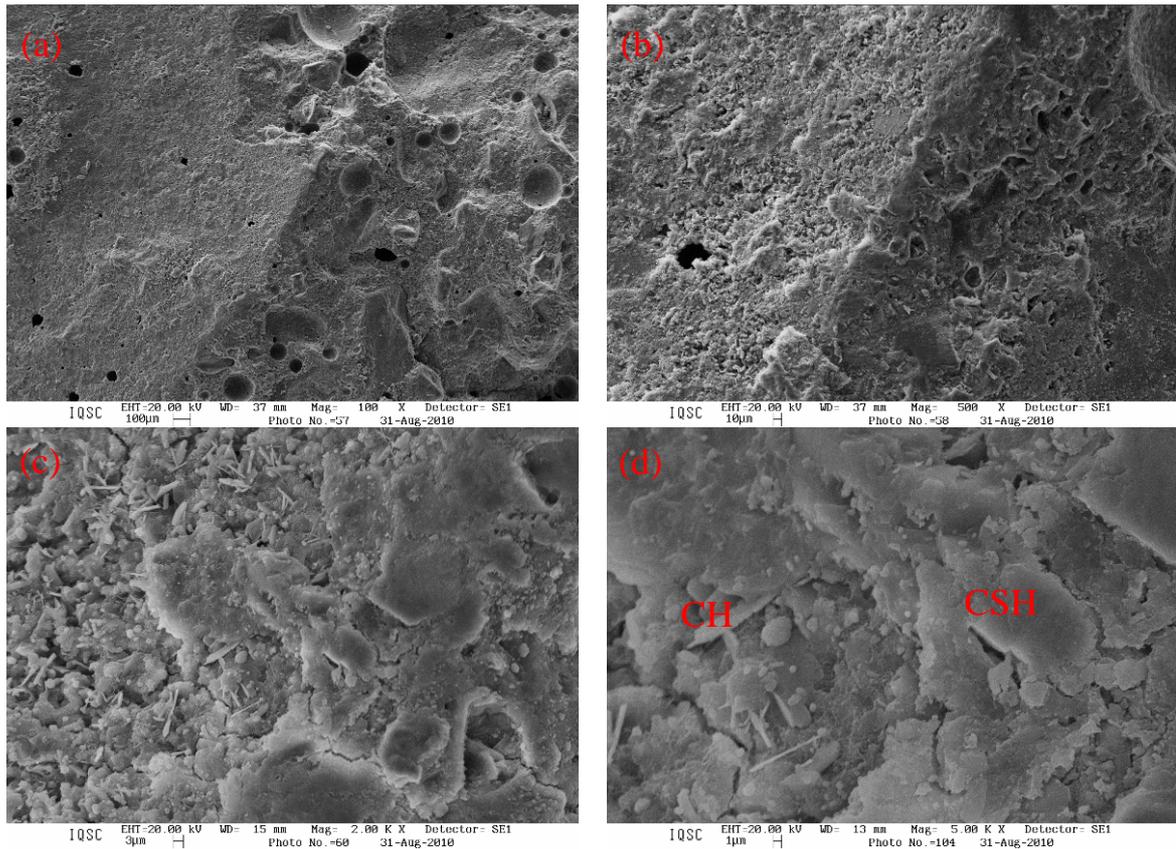
**Figura 135: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SC-75.**



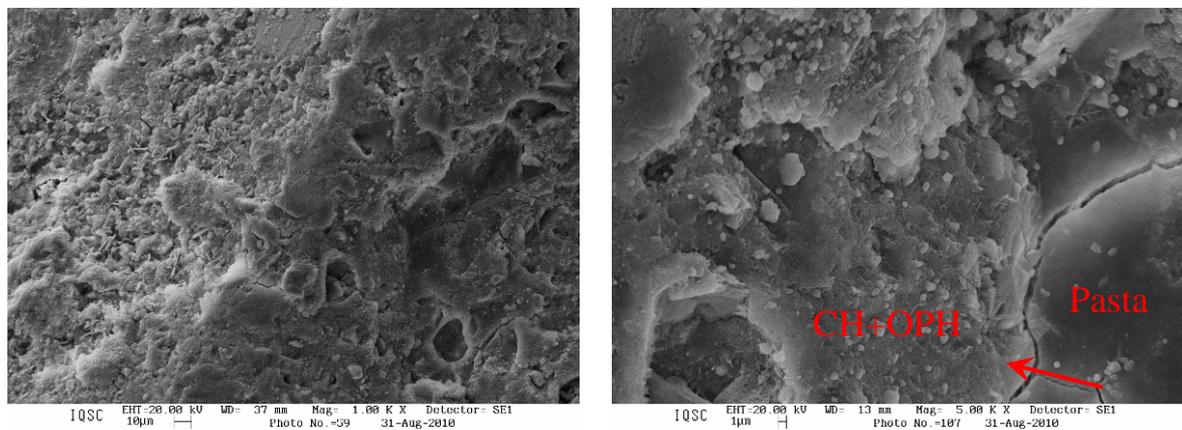
**Figura 136: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de SC-75, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado.**

A partir do conjunto de micrografias da Figura 135 e Figura 136 nota-se grande quantidade de hidróxido de cálcio na amostra de concreto controle, apresentando-se como um produto bem caracterizado em grandes cristais de prismas hexagonais e na forma de pilhas de placas geometricamente bem definidas. A fratura dessa amostra exhibe o ponto frágil, cuja ruptura coincide com as placas de CH. A quantidade e o tamanho dos cristais de CH diminuem para as micrografias da amostra de concreto dopado (Figura 137, Figura 138 e Figura 139). Observa-se maior abertura das microfissuras na amostra controle se comparada à dopada.

No caso do silicato de cálcio hidratado percebem-se duas formações distintas: no caso da amostra dopada, cuja camada de impregnação contém sílica ativa (traços SD-75-IP e SD-75-FP), o C-S-H apresenta-se em forma de cristais aciculares curtos (Figura 137c), enquanto na amostra de referência SC-75 (Figura 135), o C-S-H apresenta-se em forma de feixes fibrosos compactos ou fibras pouco cristalinas. Tais diferenças ocorrem em razão da presença da adição, o que está de acordo com a literatura.



**Figura 137: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SD-75-IP.**

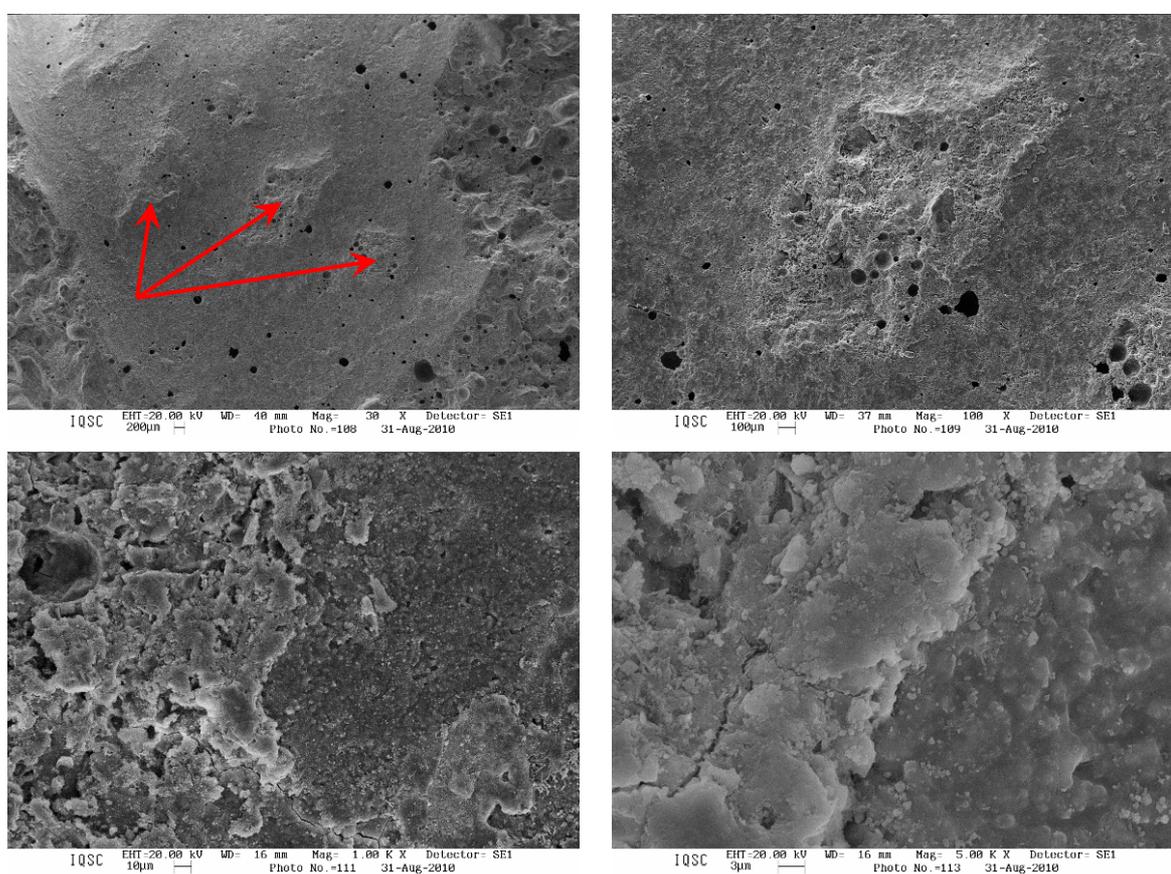


**Figura 138: Micrografias (1000x e 5000x) para amostra fraturada de SD-75-IP, evidenciando os produtos de hidratação na ZT.**

Nas micrografias da Figura 138 observa-se depositado sobre a pasta do concreto um conglomerado de produtos de hidratação (CH, OPH – inclusive o C-S-H – e pasta do concreto) e analisando a parte inferior da micrografia percebe-se que a zona de transição foi eliminada por meio da formação do C-S-H, tornando-a mais compacta. Nesse local, não se nota a separação entre os produtos hidratados e pasta do concreto (conforme indicação da seta).

Antes de analisar a região da pasta onde o agregado foi retirado, deve ser verificado um aspecto importante: se após a retirada manual do agregado, por meio de fratura da amostra, a pasta que estava sendo analisada era a de impregnação ou a do concreto, uma vez que só faz sentido estudar a região onde há calda de impregnação.

O conjunto de micrografias da Figura 139 mostra claramente essa situação. As saliências indicadas pela seta correspondem a áreas onde a camada de impregnação foi removida da amostra, ou seja, referem-se à pasta do concreto. Mais uma vez fica evidente que a pasta de impregnação contendo sílica ativa é bem mais compacta que a do concreto. A comprovação da remoção da camada de impregnação foi verificada na imagem mostrada na Figura 140, em que se pode ver a calda de alto desempenho aderida ao seixo rolado.



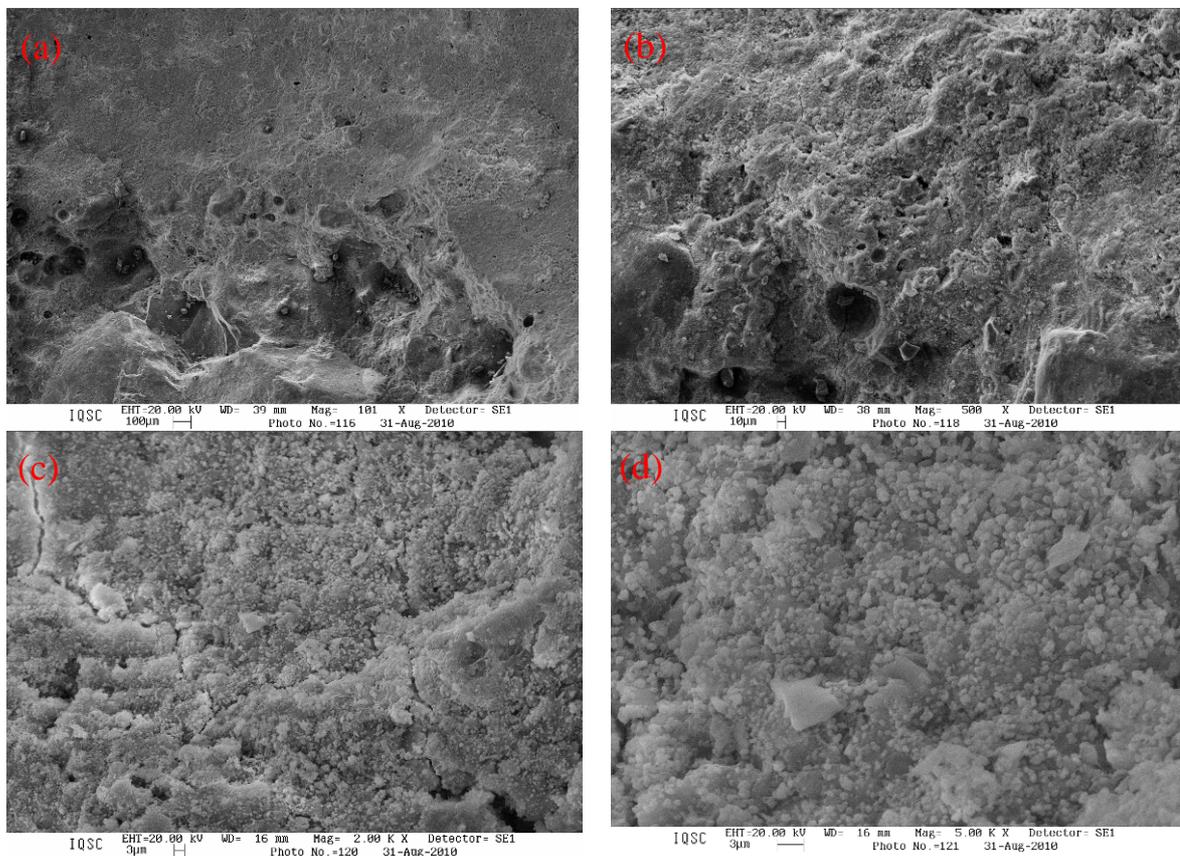
**Figura 139: Micrografias (30x até 5000x) para amostra fraturada de SD-75-IP, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado.**



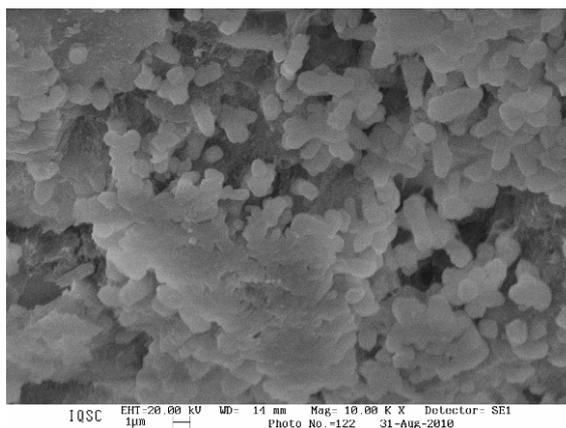
**Figura 140: Permanência da camada de impregnação no agregado.**

Em todas as amostras dopadas de concreto, parte da camada de impregnação foi removida conjuntamente com o agregado, conforme Figura 141, Figura 142, Figura 145, Figura 146, Figura 149 e Figura 150.

Analisando as micrografias da Figura 141 e Figura 142 observa-se que o concreto dopado SD-75-FP, confeccionado com calda de impregnação em final de pega, apresenta uma superfície repleta de C-S-H bem menos compacto que a superfície do concreto SD-75-IP, elaborado com calda em início de pega. Além disso, observam-se grandes placas de CH depositadas na região onde o seixo foi removido, indicando ligação frágil com a calda de dopagem e comprometimento da ligação pasta/agregado. Este quadro só reforça e justifica a escolha pelo instante de início de pega adotado na confecção dos concretos dopados.

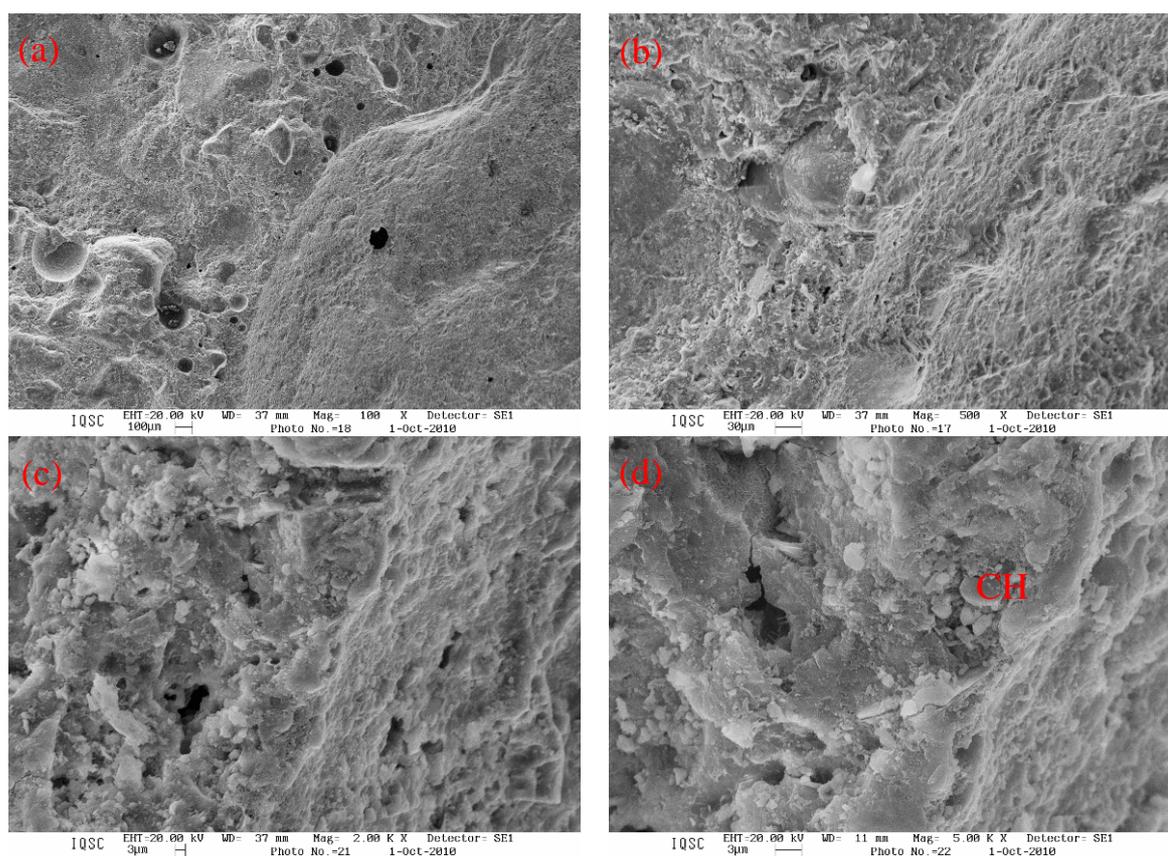


**Figura 141: Micrografias (10x até 5000x) para amostra fraturada de SD-75-FP.**



**Figura 142: Micrografia (10000x) para amostra fraturada de SD-75-FP, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado.**

As micrografias das amostras fraturadas dos concretos controle e dopado, nos traços 1:5,5, são mostradas na Figura 143, Figura 144, Figura 145, Figura 146e Figura 147.



**Figura 143: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SC-55.**

Fase presente na Micrografia (b) da Figura 144 –  
Relações em %

Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1 E	1,63	0,22	1,20

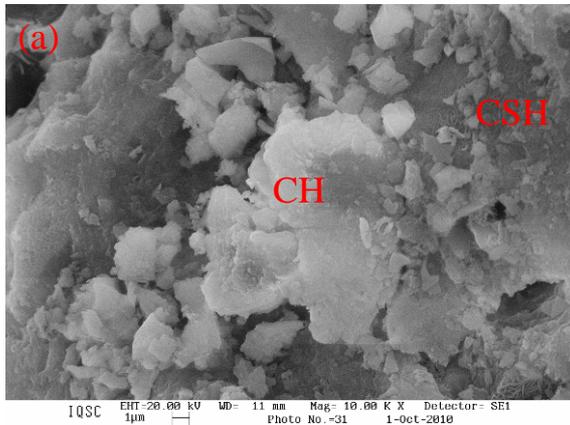


Figura 144: Ampliação (10000x) das Micrografias (c) e (d) da Figura 143.

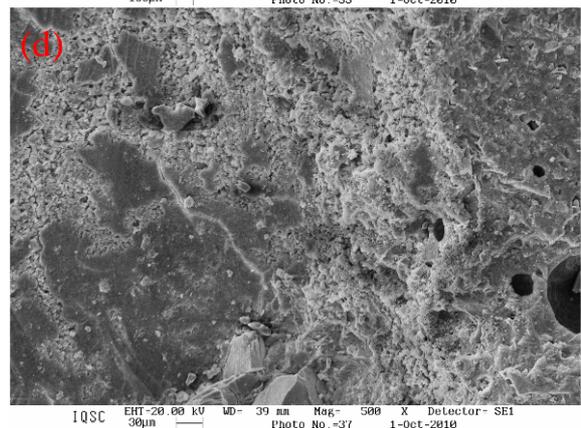
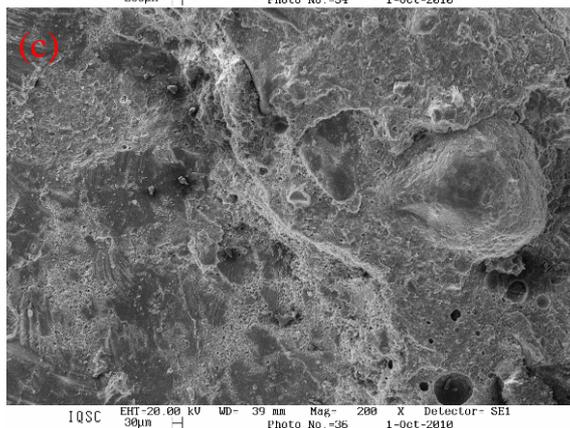
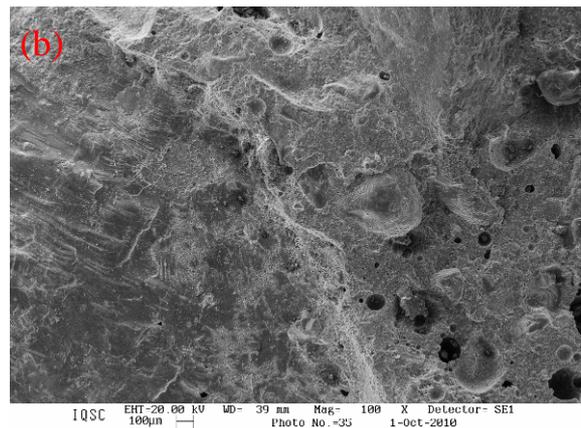
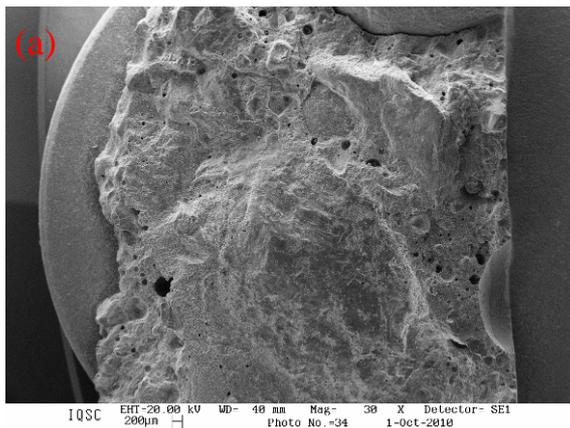
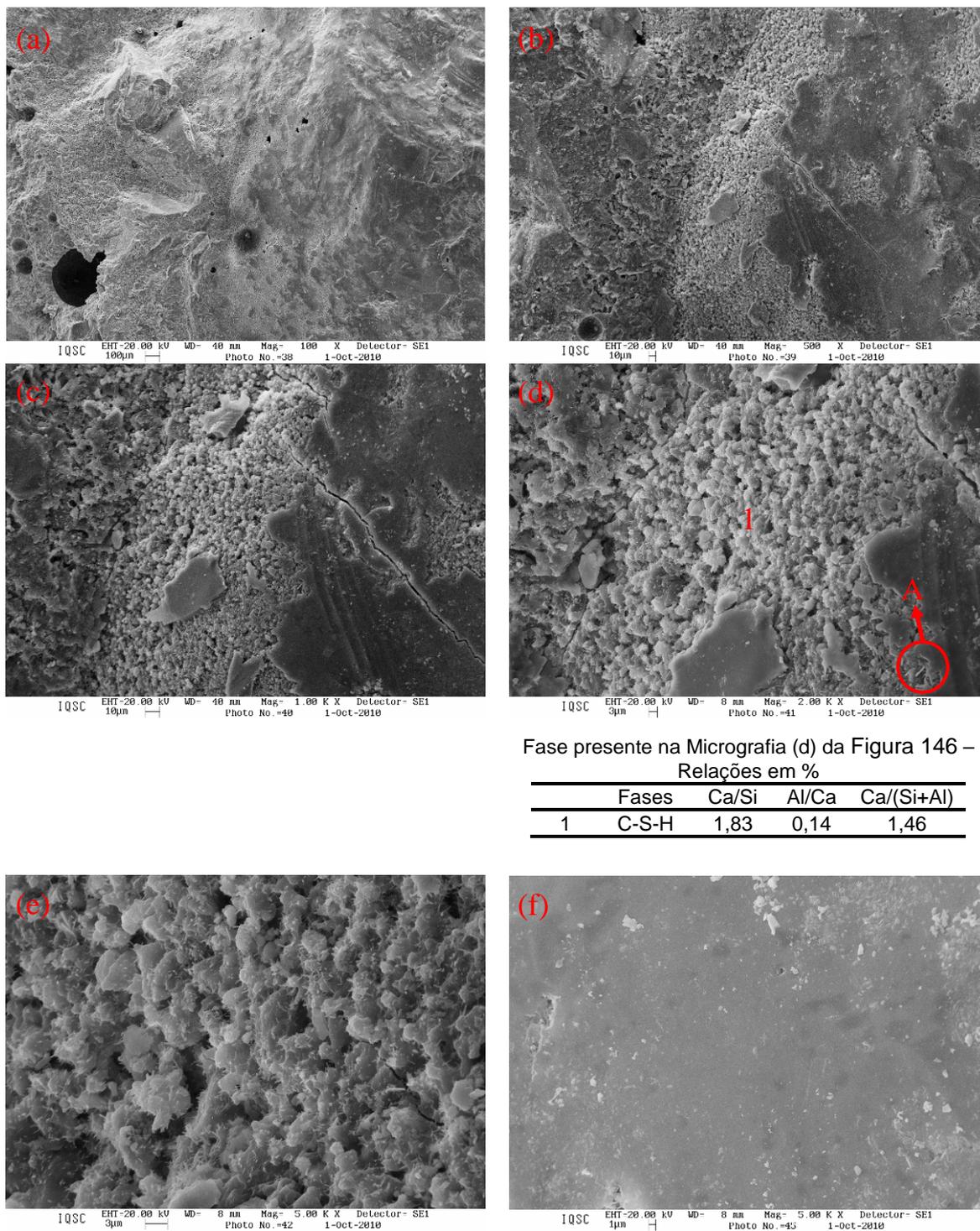


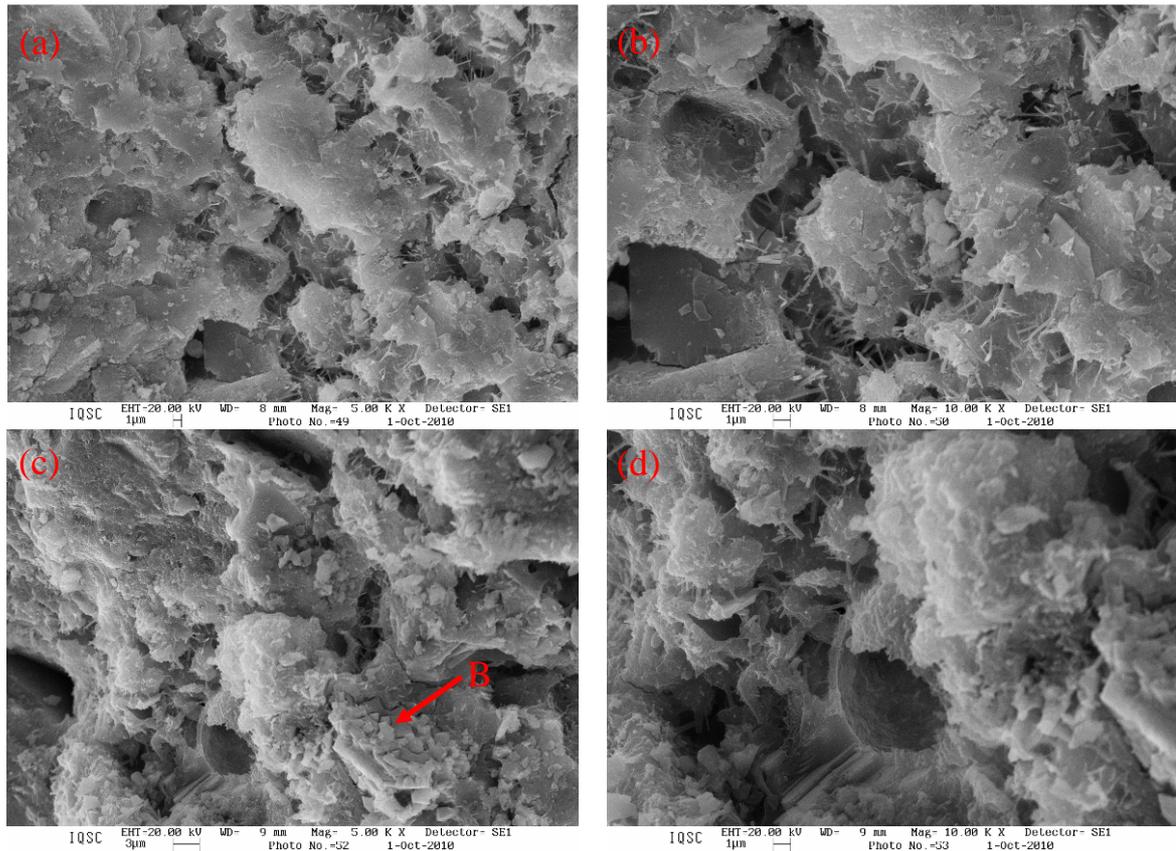
Figura 145: Micrografias (30x até 500x) para amostra fraturada de SD-55.



Fase presente na Micrografia (d) da Figura 146 –  
Relações em %

Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	1,83	0,14	1,46

**Figura 146: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SD-55, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado.**



**Figura 147: Micrografias (5000x até 10000x) para amostra fraturada de SD-55: detalhe da região onde o seixo rolado foi retirado.**

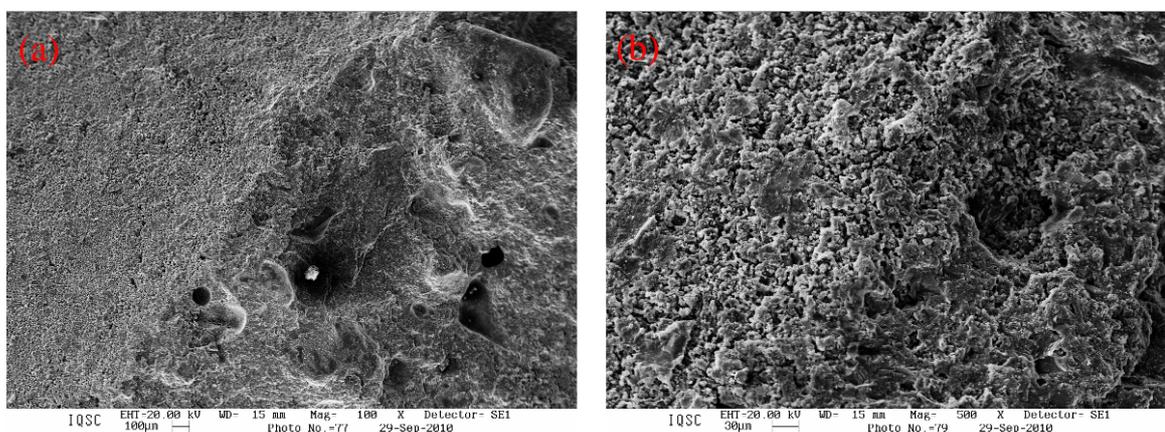
A região mais escura, localizada na parte inferior esquerda da micrografia (d) da Figura 145, corresponde à pasta de impregnação; que mais uma vez, se mostra bem compacta. As regiões mais claras são pasta do concreto.

A Figura 146 mostra as micrografias obtidas de outra parte desta mesma amostra do concreto SD-55, a qual também apresentou região mais escura de dopagem e mais clara de pasta do concreto. Ao aumentar a magnificação das imagens (micrografias (e) e (f)) fica evidente que a sílica ativa promoveu a modificação morfológica do C-S-H. Conforme consagrado na literatura, isso se deve à sua reação pozolânica, produzindo um C-S-H mais resistente e menos solúvel, morfológicamente diferente do C-S-H produzido durante a hidratação do cimento.

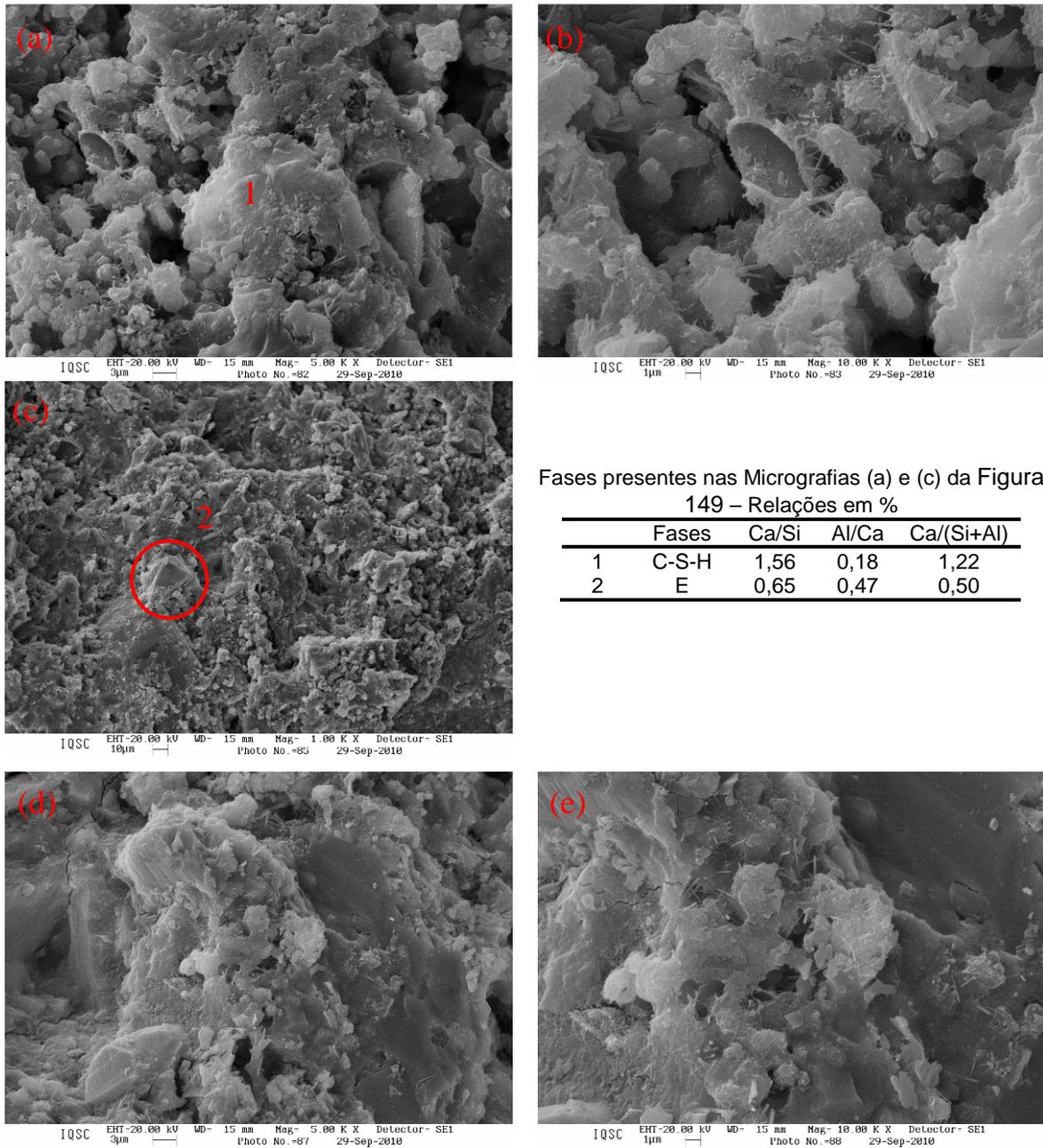
Nas micrografias (d) e (c), respectivamente, da Figura 146 e Figura 147, que apresentam amostras fraturadas do concreto SD-55, pode-se ver um exemplo das fases aluminatos (AFt e AFm). O ponto A provavelmente é AFt, com forma de cristais prismáticos aciculares, e o ponto B é provavelmente AFm, que forma em placas hexagonais com tendência à ligação entre elas tipo face-aresta.

As micrografias da Figura 148, Figura 149, Figura 150 e Figura 151 referem-se às amostras fraturadas dos concretos SC-35 e SD-35. Na micrografia (c) da Figura 149 está destacada a interface entre uma provável partícula de escória (aparentemente perdida durante a fratura da amostra) e a matriz da pasta de cimento.

De modo geral, observa-se que nas interfaces pasta/agregado analisadas há a predominância do C-S-H, o qual em algumas micrografias aparece claramente como um composto menos compacto (normalmente para o concreto controle SC-35) do que aquele proveniente da reação pozolânica (concreto dopado SD-35). A baixa relação a/agl usada nos traços 1:3,5 também influenciou na microestrutura do material, sendo observado poucos poros na zona de transição.



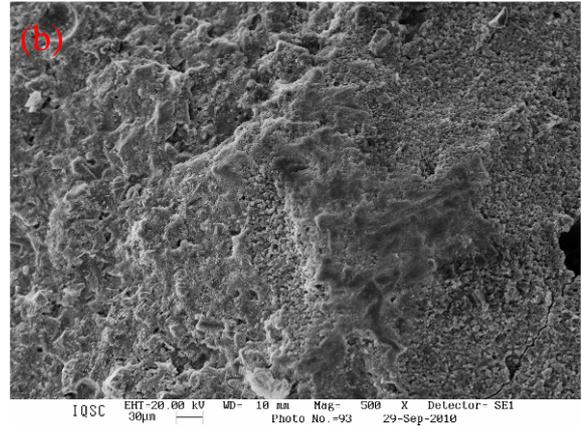
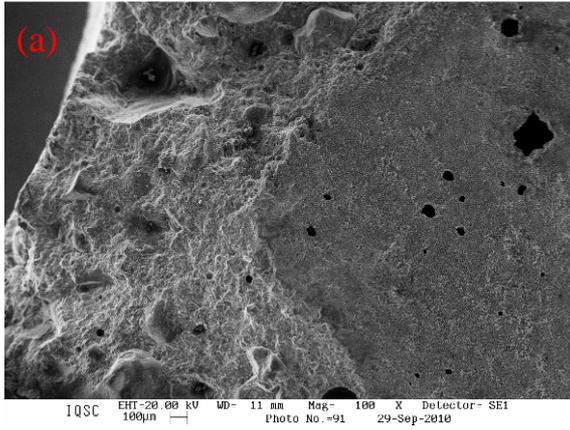
**Figura 148: Micrografias (100x e 500x) para amostra fraturada de SC-35.**



Fases presentes nas Micrografias (a) e (c) da Figura 149 – Relações em %

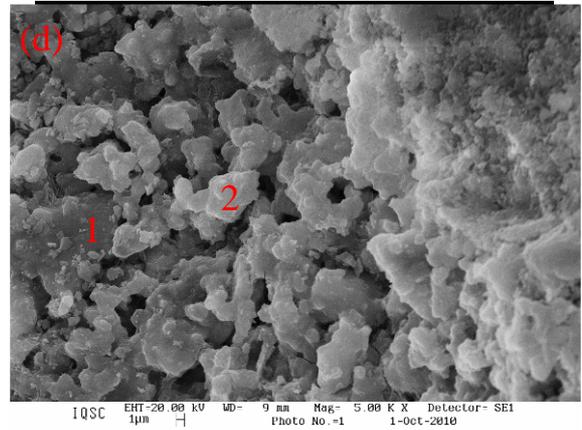
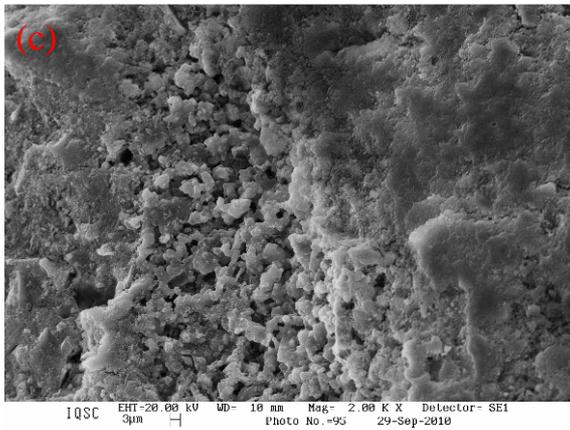
	Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1	C-S-H	1,56	0,18	1,22
2	E	0,65	0,47	0,50

Figura 149: Micrografias (1000x até 10000x) para amostra fraturada de SC-35, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado.

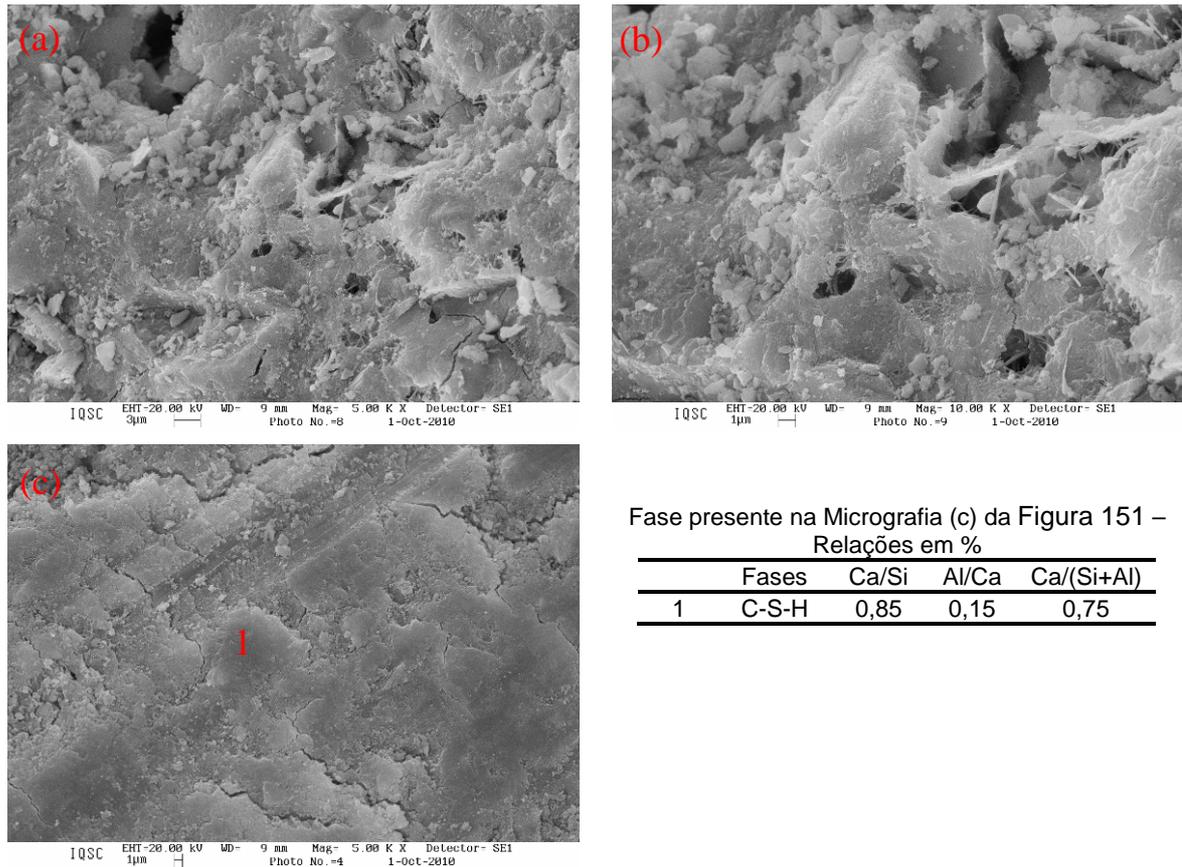


Fases presentes na Micrografia (d) da Figura 150 –  
Relações em %

Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1 C-S-H	1,42	0,12	1,21
2 C-S-H	2,47	0,11	1,93



**Figura 150: Micrografias (100x até 5000x) para amostra fraturada de SD-35.**



Fase presente na Micrografia (c) da Figura 151 –  
Relações em %

Fases	Ca/Si	Al/Ca	Ca/(Si+Al)
1 C-S-H	0,85	0,15	0,75

**Figura 151: Micrografias (5000x e 10000x) para amostra fraturada de SD-35, evidenciando a região onde o seixo rolado foi retirado.**

Como pode ser observado na Figura 146, Figura 149, Figura 150 e Figura 151 são vários os tipos de C-S-H encontrados nas pastas de cimento, os quais apresentam diferentes relações Ca/Si, que variam desde 2,47 até 0,85. Com o aumento da relação Ca/Si, o grau de cristalinidade tende a decrescer. Em geral, as relações Ca/Si apresentadas nos concretos dopados foram menores que nos respectivos concretos de referência, indicando a formação de compostos menos cristalinos. Nas interfaces pasta/agregado tanto dos concretos dopados 1:5,5 quanto nos 1:3,5 houve predominância de C-S-H de aparência menos compacta.

As micrografias mostradas na Figura 152 foram selecionadas para comporem mais uma prova da melhoria promovida na zona de interface pasta/agregado após aplicação da técnica de dopagem. De maneira totalmente oposta a da amostra controle, observa-se depositado sobre a pasta do concreto dopado um conglomerado de produtos de hidratação (CH, OPH – inclusive o C-S-H – e pasta do concreto) e na parte inferior da micrografia (à direita) percebe-se a continuidade entre estes produtos hidratados e pasta do concreto (conforme indicação da seta). Isto reforça a conclusão de que a zona de transição foi eliminada por meio da formação do C-S-H, tornando-a mais compacta.

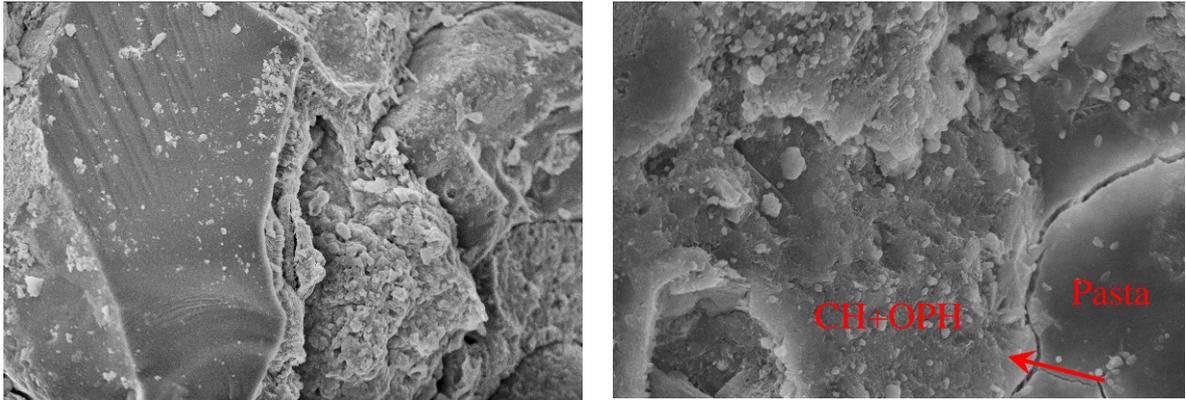


Figura 152: Micrografias (5000x) da ZT agregado/pasta do concreto (à esq.) e da ZT calda de dopagem/pasta do concreto (a dir.).

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

---

Atualmente o setor mineral discute o problema da disponibilidade dos recursos naturais, principalmente daqueles localizados dentro ou no entorno dos aglomerados urbanos. Isto por que, os agregados para a construção civil necessitam ser produzidos no entorno do local de consumo, geralmente em áreas urbanas, devido à alta participação do transporte no custo final do produto. O declínio da possibilidade de exploração destes bens minerais, em virtude do inadequado planejamento urbano e territorial, de problemas de sustentabilidade ambiental, de zoneamentos restritivos e de usos competitivos do solo, gera preocupação quanto às perspectivas de garantia de suprimento futuro.

Após a finalização de toda experimentação e considerações científicas pode-se concluir que:

- O uso de agregados outrora considerados desconhecidos aos concretos, após a aplicação da técnica da dopagem, pode ser uma solução eficiente para tal problemática, podendo ser utilizada com sucesso para diversos tipos de agregados, quer sejam eles naturais ou aqueles advindos de reciclagem;
- A técnica de dopagem segue as nuances dos agregados a serem considerados em cada situação;
- O tratamento de dopagem pode ser feito por meio da “armação” do agregado com uma matriz de alta qualidade, impregnando-o inicialmente em soluções com e sem sílica ativa, e permite modificar as características iniciais do agregado de modo a criar uma ancoragem mecânica com a matriz;
- Pode-se, perfeitamente, estabelecer uma ponte de ligação entre os agregados e as matrizes e/ou aglomerantes concreto, ainda no estado fresco, melhorando a zona de transição na interface agregado-matriz;
- A aplicação da técnica de dopagem com calda de alto desempenho reduziu em mais de 35% a porosidade do grão de laterita, demonstrando a eficiência da dopagem com calda de alto desempenho no tamponamento dos poros superficiais do agregado. Como reflexo deste resultado está a diminuição do valor de absorção, que também foi reduzida em 35% após a dopagem;

- Houve diminuição (ainda que pequena) da densidade da laterita, após esta receber o tratamento de dopagem. Esse resultado está de acordo com a diminuição da massa específica do concreto no estado fresco apresentada pelas misturas dopadas quando comparadas as controle;
- Os resultados de ensaios de resistência à compressão provaram que a técnica de dopagem com emprego de calda de alto desempenho resultou em ganho médio de 28% para os concretos feitos com laterita e de 7% para aqueles elaborados com seixo rolado;
- Na resistência à tração por compressão diametral, a técnica de dopagem representou incremento médio de 13,6% para o concreto com laterita e de 9,6% para o concreto com seixo, evidenciando o efeito mais pronunciado da técnica em traços mais pobres, independente do agregado avaliado;
- Os valores de resistência à tração na flexão dos concretos dopados superaram os dos concretos de referência, sendo que a maioria dos concretos dopados superou 5,5 MPa de resistência à tração na flexão, aos 28 dias de idade, atendendo a especificação mais exigente publicada por Mattos (2004);
- No tocante ao módulo de elasticidade, os concretos dopados com calda de alto desempenho apresentaram diminuição de valores, quando comparados aos de referência, que pode ser atribuída ao menor módulo resultante do conjunto calda + agregado. A queda média do módulo foi de 15% para o concreto laterítico e de 8,0% para o com seixo rolado;
- Os concretos dopados atingiram 40 GPa de módulo de elasticidade, aos 28 dias de idade, indicando a alta qualidade da matriz cimentícia;
- Os valores de absorção de água por imersão absorção se mostraram inferiores para traços com dopagem, independente do agregado utilizado. A diminuição na absorção foi mais significativa para os concretos lateríticos, que tiveram os valores reduzidos em até 25%;
- Todos os concretos lateríticos apresentaram absorção de água por imersão inferior a 4,2 %, podendo ser enquadrados na melhor classificação segundo o critério de Helene (1983). Somente o concreto mais pobre, 1:7,5, com seixo rolado apresentou valores em torno de 5 %, estando no limite entre qualidade média e pobre do CEB (1998) e na classificação de qualidade média de Helene (1983);

- Ao analisar o índice de vazios e compará-lo ao critério de Andrade Perdrix (1992) pode-se concluir que os concretos lateríticos são de boa qualidade, estando sensivelmente abaixo do limite de 10 %, e que os com seixo rolado são classificados como sendo de média qualidade (no intervalo de 10 a 15 %);
- Os aumentos de resistência são reflexos de melhoria na zona de transição pasta/agregado, confirmada em ensaios microscópicos, representando possibilidade de uso para muitos agregados alternativos até então pouco ou nada explorados;
- Os resultados de resistência mostraram também que a dopagem feita a partir da imersão do agregado em solução de água e sílica ativa, exclusiva para a laterita, foi prejudicial para o comportamento do concreto, uma vez que este teve suas resistências à compressão diminuídas em 10,6% se comparadas à do respectivo concreto de referência, elaborado com laterita não dopada;
- Apesar da contribuição benéfica da sílica ativa nas misturas à base de cimento, amplamente reconhecida na literatura, a saturação do agregado laterítico com solução de água e sílica ativa pode ter resultado em acúmulo localizado de água na zona de interface, prejudicando o desempenho do concreto pelo aumento de poros nesta região;
- O melhor desempenho dos concretos dopados foi resultado, portanto, da dopagem com calda de alto desempenho, elaborada com baixa relação água/aglomerante, aditivo superplastificante e sílica ativa de ferro-silício;
- As pequenas partículas de sílica ativa dispersas na calda de dopagem geraram um grande número de nucleações locais para a precipitação dos produtos de hidratação. Conseqüentemente, este mecanismo tornou a pasta mais homogênea e densa, com uma distribuição de poros mais refinada;
- Os resultados mecânicos deram indícios de que o desempenho dos concretos confeccionados com dopagem em instante de início de pega da calda de alto desempenho foi melhor do que dos confeccionados com dopagem realizada há 24 horas, fato esse confirmado posteriormente em ensaios microscópicos;
- O uso de cimento com finura mais elevada, como o CPV ARI, na calda de impregnação, foi acertado, uma vez que não comprometeu a preparação dos concretos dopados;

- A partir da associação da técnica de dopagem e de outras relacionadas à tecnologia do concreto, como a de empacotamento de partículas e o uso de aditivos e adições minerais, foram produzidos concretos de alta resistência e alto desempenho;
- A resistência à compressão simples medida em corpos de prova atingiu 60 MPa na idade de 28 dias para o concreto laterítico dopado, tendo alcançado o limite de resistência do agregado. Isto foi possível graças à matriz de alto desempenho criada, que foi capaz de envolver o agregado deficiente proporcionando a dopagem do concreto como um todo;
- Apesar de ter sido realizado apenas um ensaio de durabilidade (absorção de água por imersão), o alto desempenho do concreto com laterita é atribuído ao alto desempenho de sua matriz, amplamente comprovado em inúmeras pesquisas desenvolvidas pelo grupo LMABC com concretos de matrizes semelhantes;
- As resistências dos concretos elaborados com seixo rolado não alcançaram 50 MPa, aos 28 dias de idade, entretanto é perfeitamente possível superar tal valor utilizando-se dos mesmos recursos aplicados aos concretos lateríticos;
- Na maioria das obras correntes pode-se perfeitamente empregar os concretos confeccionados com laterita ou seixo rolado, como aqui tratado, visto que todos os concretos dopados superaram a marca de 30 MPa, aos 28 dias de idade, resistência considerada limite para classe de agressividade III da ABNT NBR 6118:2007; sendo esta um dos critérios exigidos pela norma;
- Com base no exame prévio em microscópio ótico digital, a espessura da camada de impregnação varia conforme a conformação apresentada pelo agregado, sendo que em regiões de maior reentrância a camada torna-se mais espessa, independente do agregado;
- A calda de alto desempenho promoveu a modificação na textura superficial do seixo, deixando-a mais rugosa, e para o caso da laterita sua forma ficou mais próxima da esférica, sendo preenchidas as cavidades presentes. Todas estas alterações já indicaram sucesso na aplicação da técnica de dopagem;
- A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) aplicada ao estudo da microestrutura mostrou-se bastante eficaz na caracterização das fases presentes e na avaliação da porosidade, das zonas de transição pasta/agregado e das carapaças envolventes dos agregados dopados, sendo de fundamental importância para o estudo da dopagem;

- O uso de cimento CPIII 40 RS, com teor de 46% de escória, foi pensado no sentido de diminuir a quantidade de CH nas matrizes dos concretos, aumentando-se o C-S-H, conferindo melhor desempenho a estas;
- As micrografias das amostras tratadas com solução de água e sílica ativa evidenciaram a permanência de elevada porosidade e grande quantidade de CH na zona de interface após o tratamento, corroborando resultados de perda mecânica destes concretos. Ao passo que nas micrografias das amostras dopadas com calda de alto desempenho verificou-se melhoria na zona de transição pasta/agregado. Esta interface mostrou-se bem mais compacta que a dos concretos sem tratamento de dopagem (controles). O refinamento desta região pode ser atribuído ao emprego da calda de alto desempenho, que é uma mistura de baixa porosidade, conseguida com reduzida relação água/aglomerante, e alta compacidade, devido ao uso da sílica ativa;
- A ação da sílica ativa teve grande influência nas propriedades da calda de dopagem. O C-S-H produzido a partir da reação da sílica apresentou características bem diferentes, dentre elas uma menor porosidade, quando comparado ao C-S-H produzido pelas pastas de cimentos;
- O efeito microfíler da sílica ativa nos concretos lateríticos dopados alterou a microestrutura da ZT. A sílica ativa preencheu os vazios próximos à superfície do agregado (deixados pelas partículas de cimento) e, devido às reações pozolânicas, houve redução da concentração de CH na zona de transição pasta/agregado;
- Outro ponto evidenciado no ensaio de MEV foi a permanência da camada de impregnação em torno do agregado graúdo; verificada inclusive para o seixo rolado que é um agregado cuja textura dificulta esta aderência, melhorando sua ligação mecânica com a matriz;
- Todos os concretos dopados apresentaram concentração de partículas anidras de cimento na região da zona de interface pasta/agregado, dispersas numa pasta muito compacta, repleta de C-S-H e com baixa concentração de CH. Estas características são frutos do alto teor de cimento utilizado, relação a/agl relativamente baixa e adição de superplastificante e sílica ativa;
- Diferentemente dos concretos controles, que exibiram descontinuidade na ligação agregado/pasta do concreto, todos os concretos dopados que foram confeccionados em instante de início de pega da calda de alto desempenho tiveram perfeita ligação do agregado com a pasta de impregnação e também entre esta pasta e a pasta do

concreto, indicando adequado procedimento de dopagem empregado. O procedimento de dopagem com 24 horas de hidratação da calda foi descartado devido à presença concentrada de CH na ligação calda/matriz do concreto;

- Pelas micrografias dos concretos elaborados com associação das técnicas de dopagem e de empacotamento de partículas e uso de adição mineral e de aditivo superplastificante, notou-se que o volume de vazios foi drasticamente reduzido, se comparado ao do concreto de referência. E ainda, houve maior quantidade de produtos hidratados, sendo que o C-S-H se mostrou bem mais compacto, e conseqüentemente, maior consumo de CH. Todos estes fatores justificam a alta resistência e o alto desempenho atingidos nestes concretos;
- Existe nítida diferença na coloração dos concretos dopados e não dopados. Os concretos sem dopagem apresentaram coloração avermelhada, proveniente do desgaste da laterita, e os dopados coloração esverdeada (padrão de concretos convencionais). Este é mais um indício de sucesso da técnica, significando diminuição no atrito entre as partículas e proteção superficial das mesmas;
- Se utilizada em seu estado natural, a laterita proporciona concretos em tons avermelhados, sem que haja necessidade de adicionar qualquer pigmento à mistura – o simples desgaste natural do agregado fornece coloração à mistura;
- O potencial de utilização da laterita torna-se mais atrativo para o caso dopado, uma vez que peças aparentes podem exibir os pontos avermelhados da laterita na massa acinzentada da argamassa, já que a dopagem impede o desgaste do agregado;
- Pode-se dizer que tanto os resultados mecânicos quanto os microestruturais apontam para a influência benéfica da técnica de dopagem no comportamento do concreto. Esta influência fica mais evidente em concretos correntes e é mais singela para concretos de alto desempenho, até porque a matriz deste concreto já é em sua totalidade de alto desempenho, dispensando-se a técnica.

Em suma, como resultado da experimentação, é possível melhorar o desempenho de agregados graúdos deficientes por meio da técnica de dopagem aqui desenvolvida. Ainda que seja um estudo inicial, a técnica de dopagem revela-se promissora, com expectativa de uso em outros tipos de agregados, normalmente não considerados adequados para a produção de concretos estruturais ou aperfeiçoando outros, como aqueles oriundos de demolições, sem que haja necessidade de grandes investimentos em suas classificações.

## 6.1. Sugestões para prosseguimento da pesquisa

A técnica de dopagem é uma solução eficiente e promissora para a problemática de disponibilidade dos recursos naturais. Concretos semelhantes aos desenvolvidos neste estudo têm bom potencial de aplicação. O aprofundamento na pesquisa sempre é necessário para se expandir o horizonte de conhecimentos, adequando-o de materiais às especificidades das obras. Assim, algumas sugestões para o prosseguimento da pesquisa são dadas a seguir:

- Recomendação de roteiro para estudo de dopagem, abordando a aplicação da técnica de dopagem em agregado genérico deficiente;
- Análise de outros agregados potencialmente utilizáveis, como os provenientes da indústria de construção e demolição (agregados reciclados) e da indústria cerâmica, além de argila expandida, entre outros;
- Desenvolvimento de sistema para dopagem à vácuo do agregado, desde projeto e levantamento de equipamentos necessários, até a confecção da câmara e seu funcionamento;
- Estudo aprofundado da comercialização em grande escala do agregado previamente dopado. Sugere-se que o agregado seja rolado em outro inerte, como a areia, a fim de contornar a problemática da carbonatação em longos períodos. Desta forma, sugere-se que seja criado um anteparo contra esse fenômeno, com perspectiva também no aumento da rugosidade superficial do agregado e na melhoria de aderência com a matriz de cimento. No caso do agregado laterítico, sugere-se que este seja rolado em sua própria areia (fração fina), de forma a aproveitar integralmente a composição da laterita encontrada na natureza;
- Estudo de alternativas de misturas de dopagem, avaliando-se o uso de outras adições minerais;
- Aprofundamento da avaliação de durabilidade, com a inclusão de outros ensaios, como, por exemplo, absorção de água por capilaridade, abrasão, permeabilidade, carbonatação, potencial de corrosão, penetração de cloretos, resistência química a soluções ácidas e açúcares e resistência a sulfatos;

- Avaliação da reologia de concretos dopados, incluindo análise de redução de água e consequências disto, visto que o valor de abatimento do concreto dopado é superior ao do concreto referência. Avaliação dos parâmetros reológicos, e possíveis ajustes nos traços para melhorar o desempenho mecânico e microestrutural dos concretos, podem ser necessários;
- Teste de produção em condições reais de obras. Sugere-se avaliação de mistura em misturadores horizontais e transporte em esteiras rolantes. Avaliar, com base nestes testes, a influência da mistura sobre a trabalhabilidade e desempenho do concreto;
- Aprofundamento da avaliação econômica, contemplando, se possível, a análise de custos dentro de usina de concreto com sistema de dopagem implantado;
- Emprego da técnica da dopagem em outros subsistemas existentes e associados à construção civil, mormente as placas cerâmicas, granilites, ligações de pré-moldados, etc.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C494**: Standard specification for chemical admixtures for concrete. Philadelphia, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5737**: cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218**: agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833**: concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 9935**: agregados: terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 9938**: agregados: determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos - método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 10341**: agregado graúdo para concreto: determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 10908**: aditivos para argamassa e concreto: ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768**: aditivos para concreto de cimento Portland: especificação. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: concreto: determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle e recebimento: procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 43**: cimento Portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46**: agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 51**: agregado graúdo: ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 65**: cimento Portland: determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MacGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v. 16, n. 5, p. 45-52, May. 1994.

AÏTCIN, P. C. (2000). **Concreto de alto desempenho**. Tradução Geraldo G. Serra; São Paulo: Pini, 2000. 667 p.

ALMEIDA, I. R. (1996) **Influências da microssílica e do superplastificante na durabilidade dos concretos**. Seminário "O concreto - A utilização da sílica ativa em sua composição", Rio de Janeiro, 1996.

ANDRADE PERDRIX, M. D. C. (1992). **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação CARMONA, A.; HELENE. P.; São Paulo: Pini, 1992. 103 p.

AZEVEDO, A. B. **Laterita Acreana utilizada como Agregado Graúdo no Concreto** – Seminário Sobre o Controle da Resistência do Concreto, IBC – Instituto Brasileiro do Concreto. 1983.

BAALBAKI, M., e colaboradores (1993) Properties and microstructure of high performance concretes containing silica fume, slag and fly ash. **Fly ash, silica fume, slag and other mineral by-products in concrete**, SP 132, ACI, Detroit, pp. 1433-1450.

- BACELLAR, A. A. (2001). **Competitividade da alvenaria estrutural na cidade de Manaus**. 2001. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade Tecnológica, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM (2001).
- BARBOSA, N. P.; CHAGAS FILHO, M. B. (1992). Recherche Sur Beton Avec Granulat Lateritique. (Research on Concrete With Lateritique Aggregate), The 3<sup>rd</sup> International **RILEM** Conference on Concrete in Hot Climates – Concrete Society – Published by E.S.F.N. Spon, 2-6 Boundary Row – London, 1992, p. 43-52.
- BATTAGIN, A. F. (2010). A experiência da aplicação da norma brasileira de reação álcali-agregado: ABNT NBR 15577:2008. Seminário “A reação álcali-agregado: causas, diagnóstico e soluções”, Fortaleza, 2010.
- BENTUR, A.; COHEN, M. D. Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cements mortars. In: **Journal American Ceramic Society**. Vol. 70 (10), pp. 738-743. 1987.
- BENTZ, D.P.; GARBOCZI, E.J. (1991). Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructure model. **Cement and Concrete Research**, Vol. 21, pp. 325-344.
- BENTZ, D. P.; STUTZMAN, P. E. (1997). Evolution of porosity and calcium hydroxide in laboratory concretes containing silica fume. **Cement and Concrete Research**. v. 24, n. 6, p. 1044-1050, 1997.
- BITAR, O. Y. e colaboradores (2000). Geotecnologia: tendências e desafios. **São Paulo em Perspectiva**, v.14, n.3, p.78-90, 2000.
- CABRAL JUNIOR, M. e colaboradores (2008). A mineração no Estado de São Paulo: situação atual, perspectivas e desafios para o aproveitamento dos recursos minerais. **Geociências**, v.27, n.2, p.171-92, 2008.
- CAMARINI, G (1995). **Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica**. 1995. 252f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica USP - Departamento de Construção Civil, São Paulo, 1995.
- CARNEIRO, A. M. P. BARATA, M. S. PICANÇO, M. S. (2002). Análise de propriedades de concretos produzidos com agregados de composição granulométrica otimizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51, 2002 . Belo Horizonte, MG. **Anais eletrônicos...**Belo Horizonte: IBRACON, 2002.
- CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. (2009). Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. **Revista Cerâmica**. 2009. n<sup>o</sup>. 55. p.233-251.
- CASTRO, A. L. (2007). **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades (Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos/Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- CATOIA, T.; PEREIRA, T. A. C.; CATOIA, B.; SANCHES JR., J. E. R.; CATAI; LIBORIO, J. B. L. (2008). Concreto auto-adensável com baixo consumo de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50., 2008, Salvador. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2008. p. 13.
- CATOIA, T. (2007). **Ladrilhos e revestimentos hidráulicos de alto desempenho**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- CEB-FIB - COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON & FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. (1993). **Bulletin 213/214**: model code 90. Lausanne/Switzerland, 1993.

- CETIN, A.; CARRASQUILLO, R.L. (1998) High-performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical properties. **ACI Materials Journal**- May-June - p. 252-261.
- CHAGAS FILHO, M. B.; LIBORIO, J. B. L. (2002). Pesquisadores de Campina Produzem Concreto do Futuro. **Texto de Jornal**. Correio da Paraíba, João Pessoa - PB, p. F-5 - F-5, 05 maio 2002.
- CHAGAS FILHO, M. B.; PERAZZO BARBOSA, N. (2000). Concreto Armado Laterítico: Nova Alternativa na Fabricação de Concreto para a Construção Civil. **Interação**, Campina Grande, n 1, p. 15-20, 2000.
- CHAGAS FILHO, M. B. (2005). 241f. **Estudo de Agregados Lateríticos para Utilização em Concretos Estruturais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2005.
- COLLEPARDI, M. (1998). A durabilidade em questão. **Téchne**. n. 38, p. 52 – 57, 1998.
- COSTA, M. L. (1985). Contribuição à geologia das lateritas do Acre e sua importância para a construção civil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2., Belém: **Anais**. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1985. v. 2.
- COSTA, M. L. (1988a). **Os Lateritos de Rondônia**. Belém: CPRM, 1988. (Relatório Técnico).
- COSTA, M. L. (1988b). **Lateritos: geologia, mineralogia, geoquímica, gênese e depósitos minerais**. Belém: CPRM, 1988. (Relatório Técnico).
- COSTA, M. L. (1990a). Potencial metalogenético dos lateritos da Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990. **Anais...** Belém. Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. v. 3, p. 1371-1385.
- COSTA, M. L. (1990b). Lateritos e lateritização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. v. 1, 1990b. p. 404-421.
- COSTENARO, F. L. (2003). **Desenvolvimento de concreto de alto desempenho com adições de cinza e sílica da casca de arroz**. 2003. 165f. Dissertação (Mestrado em engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP.
- COUTINHO, A. S. (1988) **Fabrico e propriedades do betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, vol. I, p. 401.
- DAL MOLIN, D. C. C. (1995). **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. 1995. 268f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- DIAMOND, I., MATTHEWS, Z. AND STEPHENSON, R. (2004) **Assessing the health of the poor: towards a pro-poor measurement strategy**, DFID Health Systems Resource Centre briefing paper, London.
- DIAMOND, S. (2000). Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. **Cement and Concrete Research**. v.30, n.10, p. 1517-1525, 2000.
- DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2011**. Disponível em <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2011/Agregados.pdf>. Acesso em: 28/09/2011.
- ELKEM (2008) **Elkem Microsilica®: Grade 920 for construction**. Disponível em: <http://www.concrete.elkem.com/dav/cd10e31b9b.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2011.

ERFOGDU, S. (2000). Compatibility of superplasticizers with cements different in composition. **Cement and Concrete Research**. v. 30, p. 767-773, 2000.

ERWIN, S. C.; ZU, L.; HAFTEL, M. I.; EFROS, A. L., KENNEDY, T. A.; NORRIS, D. (2009). Doping semiconductor nanocrystals. **Nature**, 436, 91-94, 2009.

FAGURY, S. C. (2002) **Concretos e pastas de elevado desempenho**: contribuição aos estudos dos reparos estruturais e ligações entre concreto novo e velho, com tratamento da zona de interface. 2002. 184f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Interunidades (Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos/ Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FLATT, R. J.; HOUST, Y. F. (2001). A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. **Cement and Concrete Research**. V. 31, n. 8, 2001. p. 1169-1176.

FLATT, R. J. (2004). Dispersion forces in cement suspensions. **Cement and Concrete Research**. V. 34, n. 3, 2004. p. 399-408.

FRAZÃO, E. B. (2010). **Panorama da produção e aproveitamento de agregados para construção civil**. Curso oferecido por Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia e a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC – em Programa de Capacitação de Gestores de Empresas Mineradoras de Agregados para a Construção Civil. Amazonas, 2010.

FUTIDA, C. J.; LIBORIO, J. B. L. (2005). A UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO LATERÍTICO EM CONCRETOS DE ELEVADO DESEMPENHO. In: 13o SIICUSP - Congresso Internacional de Iniciação Científica, 2005, São Carlos. **Anais** do 13o. SIICUSP, 2005.

FUTIDA, C. J. (2005). “**Utilização do agregado graúdo laterítico em concretos de elevado desempenho**”. Iniciação Científica (Graduando em Engenharia de Estruturas). Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/USP. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Jefferson Benedicto Libardi Liborio. São Carlos. 2005.

GARTNER, E. M.; GAIDIS, J. M. (1989). **Hydration mechanisms**. In: Materials Science of Concrete I. Ed. Skalny, J. P., American Ceramic Society, 1989.

GIACCO, G.; ROCCO, C.; VIOLINI, D.; ZAPPITELLI, J.; ZERBINO, R. (1992). High strength concretes incorporating different coarse aggregates. **ACI Materials Journal**, 1992, p. 242-246.

GLASSER, F. P. (1991). Chemical, mineralogical and microstructural changes occurring in hydrated slag-cement blends. In: **Material Science of Concrete II**, 1991.

GU, P., XIE, P., BEAUDOIN, J. J. & JOLICOEU, C. (1994). Investigation of the Retarding Effect of Superplasticizers on Cement Hydration by Impedance Spectroscopy and other methods. **Cement and Concrete Research**, vol 24, nº 3, p. 433-442.

HANSEN, T.C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985. RILEM Technical Committee. 37 DRC. **Matériaux et Constructions**. v.19, n.111, p.201-246.

HARRISON, D. J.; BLOODWORTH, A. J. (1994). Industrial Minerals Laboratory Manual: **Construction Materials**. BSG Technical Report WG94/12. 1994.

HELENE, P. R. L.; PEREIRA, F. (2005). **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1. ed. São Paulo: Red Rehabilitar, 2005. v. 1. 715 p.

- HELENE, P. R. L. (1993). **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre-docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HELENE, P. R. L. (2005). Dosagem do concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 15, p. 439-472.
- IBGE (2004). **Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente** (2004). Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Meio Impresso. Rio de Janeiro, 2004.
- IBGE (2010). Sistema de Contas Nacionais. Brasil - 2004/08. **Contas Nacionais**. No. 31. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de Contas Nacionais. Meio Impresso. Rio de Janeiro. 2010.
- ISAIA, G. C. (1995). **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese (doutorado). 280 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J.F. (1983). Hydration of Portland cement. in: structure and performance of cements. Ed. Barbes, P. **Applied Science Publishers**, London, 1983.
- KANTRO, D. L. (1980) Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement, Concrete and Aggregates**, 2 (2), Winter. p. 95-108, 1980.
- KAUPPI, A; ANDERSSON, K. M.; BERGSTRÖM, L. (2005). Probing the effect of superplasticizer adsorption on the surface forces using the colloidal probe AFM technique. **Cement and Concrete Research**, V. 35, n 1, 2005, p. 133-140.
- KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. (2005). O cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 10, p. 295-322.
- KIRCHHEIM, A. P.; SOUZA, R. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. (2010) Álcalis incorporados ao aluminato tricálcico: efeitos na hidratação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 177-189, jan./mar. 2010.
- KJELLEN, K. O; WALLEVIK, O. H; FJÄLLBERG, L. Microstructures and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete. **Advances in Cement Research**. 1998; 10(1):33-40.
- KOCABA, V. (2009) **Development and Evaluation of Methods to Follow Microstructural Development of Cementitious Systems Including Slags**. 2009. 263f. Tesis (Doctorado en Science et Génie des Matériaux). Programme Doctoral en Science et Génie des Matériaux, À La Faculté Sciences et Techniques de L'ingénieur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 2009.
- KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W. (2007). **Aggregates in Self-Consolidating Concrete**. Austin/Texas/USA: International Center for Aggregates Research (ICAR): 2007, 353 p. (final report ICAR project 108).
- LARBI, J.A.; BIJEN, J.M. (1990). Orientation of calcium hydroxide at cement paste/aggregate interface in mortars in the presence of silica fume: a contribution. **Cement Concrete Research**, Elmsford, v.20, n.3, p.461-470, May. 1990.
- LEVY, S.M. (1997). **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo. 148p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LI, Y., LANGAN, B. W.; WARD, M. A. (1996) The strength and microstructure of high-strength paste containing silica fume. **Cement, Concrete and Aggregates**, vol. 18, No. 2, pp. 112-117, 1996.

LIBORIO, J. B. L.; CASTRO, A.L.; da SILVA, F.G.; SILVA, V.M. Demystifying the production process of high performance and high strength concretes – design considerations. **IV High Performance Concrete Structures**. 2005.

LIBORIO, J. B. L.; FAGURY, S. C. (2002) A utilização de concretos e pastas, com adição de sílica ativa e aditivo superplastificante, como material de reparo para estruturas de concreto. In: XV CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2002, Natal/RN. **Anais...Natal**: [s.n.]. 1 CD.

LIBORIO, J. B. L.; HELENE, P. R. L.; CASTRO, A. L.; COSTENARO, F. L.; SILVA, F. G.; SILVA, V. M.; FAGURY, S. C. (2003) Desenvolvimento Tecnológico dos Concretos nos Últimos 50 Anos. In: **Concreto Colloquia 2003**, São Carlos/SP. Concreto Colloquia, 2003.

LIBORIO, J. B. L.; MELO, A. B.; SILVA, I. J.; SOUZA, M. F. (1998) Influência do teor de adição de sílica amorfa (de ligas Ferro-Silício) nas propriedades mecânicas em pastas de cimentos Portland de alta resistência inicial. In: 42º Congresso Brasileiro de Cerâmica & 4º Ibero Americano de Cerâmica, Vidrios Y Refractários, 1998, Poços de Caldas. **Anais...São Paulo**. v. 2. p. 714-717.

LIBORIO, J. B. L. (1997). Alguns cuidados a serem observados na execução de pisos industriais e elementos estruturais de edifícios em concreto de alto desempenho. In: REIBRAC – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 39, 1997, São Paulo. **Anais...São Paulo**: [s.n.]. 1 CD.

\_\_\_\_\_. (1998). A técnica da dopagem aplicada em revestimentos cerâmicos, revestimentos em argamassa e na recuperação de estruturas de concreto. EESC-USP. 1998.

\_\_\_\_\_. (1999). Patologia na Construção Civil. **Notas de Aula**, disciplina de pós-graduação SET 5891 - Tecnologia dos concretos estruturais. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 1999.

\_\_\_\_\_. (2002). Avanços na tecnologia do concreto estrutural. In: **IBRACON: 30 anos aperfeiçoando o concreto no Brasil**. 2002, São Paulo. Anais de Comemoração dos 30 Anos do Ibracon, 2002.

\_\_\_\_\_. (2003). Concreto de alto desempenho: uma tecnologia simples para produção de estruturas duráveis. **Notas de aula**, disciplina de pós-graduação SET 5891 - Tecnologia dos concretos estruturais. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 2007, p. 42.

\_\_\_\_\_. (2004). Concreto de Alto Desempenho – Uma Tecnologia Simples Para a Produção de Concretos Duráveis. **Revista Técnica**. Editora Pini - Dezembro de 2004, São Paulo.

LIMA, S. M.; LIBORIO, J. B. L.; MELO, A. B (2008). Preparação de amostras de concreto para microanálise: procedimento. In: XXXIII Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. **CD ROM**. Santiago, Chile, 23 - 30 Mayo, 2008.

LIMA, S. M. (2006). **Concretos de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas**. 2006. 237 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LIMA, S. M. (2008). **Concreto de alto desempenho aplicado a sistemas de processamento e armazenagem de alimentos em baixas temperaturas**. 2008. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LOTENBACH, B.; LE SAOUT, G.; GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. **Cement and Concrete Research**. v. 38, n. 6, 2008. p 848–860.

- MAGALHÃES, A. G. (2007). **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. 2007. 237f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- MARTIN, J. F. M. (2005). Aditivos para concreto. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. Cap. 41, p. 1260-1295.
- MASO, J. C. (1996). **Rilem Report 11: Interfacial Transition Zone in Concrete**. E&FN SPON, Chapman & Hall, London, (1996).
- McGEARY, R.K. (1961). Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**. v. 44, p. 513-522. 1961.
- MECHI, A. e SANCHES, D. L. (2010) Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estud. av. [online]**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220. 2010.
- MEHTA, P. K.; AITCIN P. C. (1990). Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, CCAGDP, vol.12, n.2, pp. 70-78.
- MEHTA, P.K.; MANMOHAN, D. (1981) Pore size distribution and permeability of hardened cement paste. In: 7<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 1981, Paris. **Proceedings...**Paris, 1980, 8 v., p. VII-1 – VII-5.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994). **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Editora Pini. São Paulo, 1994. 573p.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2008). **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Tradução da 3. ed. em inglês. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.
- MEHTA, P. K. (2001) Reducing the Environmental Impact of Concrete. **Concrete International**, v.23, n. 10, Oct. p.61-66, 2001.
- MELFI, A. J. (1997). Lateritas e processos de laterização. **Apostila** – publicação 93. Escola de Engenharia de São Carlos. USP. 29p. 1997.
- MELO, A. B. (2000). **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. 2000. 271 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades (Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos/ Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- MOIZINHO, J. C. (2007). **Caracterização e uso de agregados lateríticos do Distrito Federal e do estado de Roraima em CBUQ**. 2007. 315f. Tese (Doutorado em Geotécnica). Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- MOIZINHO, K. J. C (1994). **Influência de Energia Térmica em Propriedades Mecânicas e Físicas de Agregados Lateríticos Utilizados em Concreto Betuminoso**. 1994. 148f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica). Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1994.
- NEVILLE, A. M. (1982). **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso da 3. ed. em inglês. São Paulo: Pini, 1982. 738 p.
- \_\_\_\_\_. (1997). **Propriedades do concreto**, Trad. Por Salvador E. Giammusso, Editora Pini, São Paulo. 828p.
- NILSEN, A. U.; MONTEIRO, P. J. M. (1993) Concrete: a three phase material. **Cement and Concrete Research**. v. 23, n 1, 1993. p. 147-151.

NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F., BELIGNI, M.; CINCERRE, J. R. (2000). "**Pavimentos com Solos Lateríticos e gestão de manutenção de Vias Urbanas**". São Paulo.

OLIVEIRA, D. R. C.; POMPEU NETO, B. B.; FUJIYAMA, R. T.; FERREIRA, M. P. (2011) Propriedades mecânicas de concreto laterítico com metacaulim. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. v.1, n.17, mai. 2011, p.25-31.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PELEGGI, R. G.; PANDOFELLI, V. C. (2000) Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo Arte Editorial**, 2000. 195p.

OLIVEIRA, J. A. (2000). Materiais alternativos de Pavimentação: a necessidade de praticá-los. **II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul**, Porto Alegre, p. 165-172.

PATEL, H. H., BLAND, C. H. & POOLE, A. B. (1996) The microstructure of steamcured pre-cast concrete. **Advances in Cement Research**, 8, No 29, pp. 11-19, jan, 1996.

PAULON, V. A. (1996) Interface entre pasta de cimento e agregado: a influência na durabilidade dos concretos. **Téchne**. no 25, p. 29-31, 1996.

PERAZZO BARBOSA, N.; CHAGAS FILHO, M. B (1982). O Concreto Laterítico e seu Emprego em Vigas Estruturais, Vol. I. **30ª Reunião Anual da OBRACON** – Instituto Brasileiro do Concreto do Rio de Janeiro, 8 a 12 de agosto de 1998, p. 208-218.

PERAZZO BARBOSA, N.; CHAGAS FILHO, M. B (1990). Análise de Segurança e Flexão de Vigas de Concreto Laterítico Armado. **10º Encontro Nacional de Construção**, de 20 a 24 de abril de 1990, Gramado-RS.

PERAZZO BARBOSA, N.; CHAGAS FILHO, M. B. (1996) Concreto Laterítico Armado. **Revista Estrutura**, nº 115, Rio de Janeiro, junho de 1996, p. 80-87.

PEREIRA, T. A. C. (2010) **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2009. 281 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PREDEEP, P.; NAJIDHA, S.; SREEJA, R.; SAXENA, N. S. (2005) Surface modification of natural rubber by ion implantation: evidence for implant doping. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (Print)**. v. 240; n. 4. p.850-854.

RAMACHANDRAN, V. S. (1985) Concrete admixture handbook – properties, science and technology, **Noye publications**. N. Jersey, 1985.

RAMIREZ, A. (2007) **Aspectos históricos da pesquisa genética em atletas e a participação do Comitê Olímpico Internacional**. In: Moragas M; DaCosta L. (Org.). Seminars Spain-Brasil University and Olympic Studies. Barcelona: Centre d'Estudis Olímpics UAB, 2007, 448-457.

REBMANN, M. S. (2011). **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento portland e alta resistência**. 2011. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estrutura) - Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

REBMANN, M. S.; TRIGO, A. P. M.; LIBORIO, J. B. L. (2010). Melhorando as características mecânicas e microestruturais de concretos com cimento CII-Z através de métodos de empacotamento e de dispersão de partículas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2010, p. 16.

- RICHARDSON, I. G.; GROVES, G. W. (1992) Microstructure and microanalysis of hardened cement pastes involving ground granulated blast-furnace slag, **Journal of Materials Science**, 27, 6204-6212, 1992.
- ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. (2008) Influência da técnica de dispersão nas propriedades da sílica ativa. **Cerâmica**, v. 54, p. 456-461. 2008.
- SARKAR, S.; AITCIN, P. C.; DJELLOULI, H. (1990) Synergistic roles of slag and silica fume in very high-strength concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, vol. 12, No 1 , pp. 800-808, summer 1990.
- SCRIVINER, K. L. (1988). The microstructure of concrete. Skalny. Materials Science of Concrete I. Westerville/USA: **The American Ceramic Society**, 1988.
- SCRIVENER, K. L., CRUMBIE, A. K., LAUGESSEN, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, The Netherlands, v. 12, n. 4, p. 411–421, out. 2004.
- SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. (2011) Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**. 2011. v. 41, n. 7, p. 651-665.
- SCRIVENER, K. L. (2004). Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. **Cement and Concrete Composites**, The Netherlands, v. 26, n. 8, p. 935–945, nov. 2004.
- SILVA, F. G. (2006). **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 236 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades (Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos/ Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- SILVA, I. J. (2000) **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho**: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. 2000. 303 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Interunidades (Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos/Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- SILVA, V. M. (2002). **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem adição de sílica ativa**. 2002. 170f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Interunidades (Instituto de Física de São Carlos/ Instituto de Química de São Carlos/ Escola de Engenharia de São Carlos), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002
- SILVA, V. M. (2007). **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 306f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- SILVA, V. S.; LIBORIO, J. B. L. (2002) Estudo da microestrutura da interface Argamassa/substrato de concreto através da microscopia eletrônica de varredura. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2002, Natal/RN. **Anais...Natal**: [s.n.]. 1 CD.
- SILVA, V. S.; LIBORIO, J. B. L. (2005) Análise microestrutural da interface chapisco/argamassa. In: **VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, 2005, Florianópolis. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2005.
- SILVA, V. S. (2004) **Aderência de chapiscos em concretos estruturais**: melhoria da microestrutura da zona de interface pela adição da sílica da casca de arroz. 2004. 223f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SILVA FILHO, A. F.; MOURA, W. A.; LEITE, R. S. (2002) Caracterização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo para produção de concreto. **Sitientibus**, n. 26, p. 95-110, 2002.

SOMBROEK, V. G. (1996) Amazon soils: a reconnaissance of the Brazilian of the soils of the Brazilian Region. **Wageningen, Center for Agriculture**, 1966. 292 p. (Published Document).

SOUSA, J. L. F. (2007) **Estudo de durabilidade de concretos e argamassas através de RAA em agregados convencionais da região de campina grande e alternativos em concreções lateríticas Sapé - PB e Jacumã - PB**. 2007. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

STANDARD SPECIFICATION FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF CONCRETE STRUCTURE (1991). **Japan Society of Civil Engineers**, 1991. p. 51-52.

STEPHAN, D.; DIKOUNDOU, S. N.; RAUDASCHL-SIEBER, G. (2008) Hydration characteristics and hydration products of tricalcium silicate doped with a combination of MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Thermochimica Acta**. V. 472 (2008), p. 64-73.

STEPHAN, D.; WISTUBA, S. (2006) Crystal structure refinement and hydration behaviour of doped tricalcium aluminate. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.36. p. 2011-2020. (2006).

STROEVEN, P.; STROEVEN, M. (1999) Space system for simulation of aggregated matter application to cement hydration, **Cement Concrete Research**. 29, 8 (1999) 1299-1304.

TANNÚS, A. e colaboradores. (2007) **Agregados para a construção civil no Brasil**. Contribuição para a formulação de políticas públicas. MG: MME/SGM/CETEC, 2007.

TAKEYA, T. (2001). Análise experimental de estruturas. **Notas de aula**. Serviço gráfico. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC, Universidade de São Paulo, 2001.

TAYLOR, H. F. W. (1992). **Cement Chemistry**. London: Academic Press, 1992. 475 p.

TAYLOR, H. F. W. (1997). **Cement Chemistry**. Thomas Telford, 2a Edição, London, 1997.

THOMASS, T. C. H.; FLOYD, O. S. (1963). Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar. **ACI Journal**, vol 60, n° 4, 1963. p. 465-486.

TIBONI, R. (2007). **A utilização da cinza da casca de arroz de termoeétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TOWSE, D. (1959) Lateritas aluminosas do baixo Amazonas. **Engeneering Mineration and Metalurgy**, v. 30, n. 177, p. 133-135, 1959.

TRIGO, A. P. M.; REBMANN, M. S.; LIBORIO, J. B. L. (2010). Uso da técnica de dopagem no tratamento da zona de transição de concretos com seixo rolado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2010, p. 15.

TRIGO, A. P. M.; CONCEIÇÃO, R. V.; LIBORIO, J. B. L. (2010). A técnica de dopagem no tratamento da zona de interface: ligações entre concreto novo e velho. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre. v.10, n.1, p.167-176. 2010.

UCHIKAWA, H. (1993a). Materials design of high-strength concrete. **Gypsun and lime** (in Japanese), n° 242, 1993. p. 2-15.

---

\_\_\_\_\_. (1993b). Characterization and material design of high-strength concrete with superior workability. **Cement Technology**. Edited by E. M. Gartner & H. Uchikawa, Ceramic Transactions, vol. 40, 1993. p. 143-186.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D. (1997) The role of esteric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 27, no 1, p. 37–50, 1997.

ZAMPIERI, V. A. (1989). **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 1989. 191 f. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ZHANG, M. H.; GJORV, O. E. (1992). Penetration of cement paste into lightweight aggregate. **Cement Concrete Research**. V. 22, n. 1, 1992. p. 47-55.

WU X.; ROY, D. M.; LANGTON, C. A. (1983) Early hydration of slag-cement. **Cement and Concrete Research**, 13 (2), 277-286, 1983.

## APÊNDICES

---

---

### Apêndice A – Caracterização do material

#### A.1. Cimento

**Análise química:**

A análise química dos cimentos utilizados foi feita por fluorescência de raios-X no Laboratório da CESP (Companhia Energética do Estado de São Paulo) de Ilha Solteira.

**Massa específica:**

Corresponde à relação entre a massa de uma determinada quantidade de material e o volume ocupado por ela. Para o cimento, o ensaio, que se dá por meio do frasco volumétrico de “Le Chatelier”, segue as especificações da ANBT NBR NM 23:2001 – Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica.

**Área específica Blaine:**

Resultados fornecidos pelo Laboratório da CESP de Ilha Solteira.

**Água da pasta de consistência normal:**

Com este ensaio determinou-se o teor de água que confere consistência normal à pasta de cimento Portland. Este ensaio foi realizado seguindo as especificações da ANBT NBR NM 43:2003 – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal.

**Início e fim de pega:**

O ensaio para determinação dos tempos de início e fim de pega dos cimentos foi realizado de acordo com as especificações da ANBT NBR NM 65:2003 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.

**Resistência à compressão:**

Resultados fornecidos pelo Laboratório da CESP de Ilha Solteira.

Os ensaios de caracterização realizados para os cimentos CPIII 40 RS e CPV ARI forneceram os dados apresentados nas Tabelas 18 e 23.

**Tabela 26: Propriedades físicas dos cimentos Portland utilizados.**

Características	CPIII 40 RS	CPV ARI	
Finura peneira ABNT 200 (% retida)	0,2	0,07	
Finura peneira ABNT 325 (% retida)	1,50	0,19	
Superf. espec. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4.371	4.743	
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,99	0,95	
Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	2,96	3,12	
Água de consistência da pasta (%)	31,6	32,0	
Início de pega (h:min)	02:55	01:50	
Fim de pega (h:mim)	03:30	02:43	
Resistência à Compressão Axial (MPa)	03 dias	24,4	44,4
	07 dias	28,8	47,9
	28 dias	36,8	52,2
Perda ao fogo (%)	3,50	4,06	
Resíduos Insolúveis (%)	1,66	0,84	
Teor de Escória (%)	46,14	-	
Óxidos de Silício (SiO <sub>2</sub> ) (%)	25,64	19,20	
Óxidos de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	2,18	3,03	
Óxidos de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (%)	10,24	5,97	
Óxidos de Cálcio (CaO) (%)	51,69	63,47	
Óxidos de Magnésio (MgO) (%)	3,32	0,59	
Óxidos de Enxofre (SO <sub>3</sub> ) (%)	1,82	2,76	
Óxidos de Sódio (Na <sub>2</sub> O) (%)	0,22	0,17	
Óxidos de Potássio (K <sub>2</sub> O) (%)	0,63	0,83	
Equiv alcalino em Na <sub>2</sub> O (%)	0,63	0,71	
Cal livre em CaO (%)	1,04	2,19	
Composição potencial (%) - Determinada a partir das equações de Bogue			
C <sub>3</sub> S	-	51,97	
C <sub>2</sub> S	-	15,86	
C <sub>3</sub> A	-	10,69	
C <sub>4</sub> AF	-	9,22	

**Fonte: relatórios C.060-2011 (CPV ARI) e 23280 (CPIII 40 RS) do LCEC/CESP.**

## A.2. Agregado

### **Granulometria:**

ANBT NM 248:2003: Agregados: Determinação da composição granulométrica.

### **Diâmetro máximo característico:**

Grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura de malha quadrada, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa (ANBT NBR NM 248:2003).

### **Módulo de finura:**

Soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100 (NBR NM 248:2003).

### **Massa específica seca e absorção:**

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco em estufa (100°C a 110°C) até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis. Segue as especificações da ANBT NBR NM 52:2009: Agregado miúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e da ANBT NBR NM 53:2009: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Além da ANBT NBR NM 30:2001: Agregado miúdo: Determinação da absorção de água e da ANBT NBR NM 53:2009.

### **Massa unitária compactada e massa unitária solta:**

ANBT NBR NM 45:2006: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

### **Material pulverulento:**

Partícula mineral com dimensão inferior a 0,075 mm, incluindo os materiais solúveis em água presentes nos agregados. Segue as especificações da ANBT NBR NM 46:2003: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.

**Torrões de argila:**

ANBT NBR 7218:2010: Agregados: Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

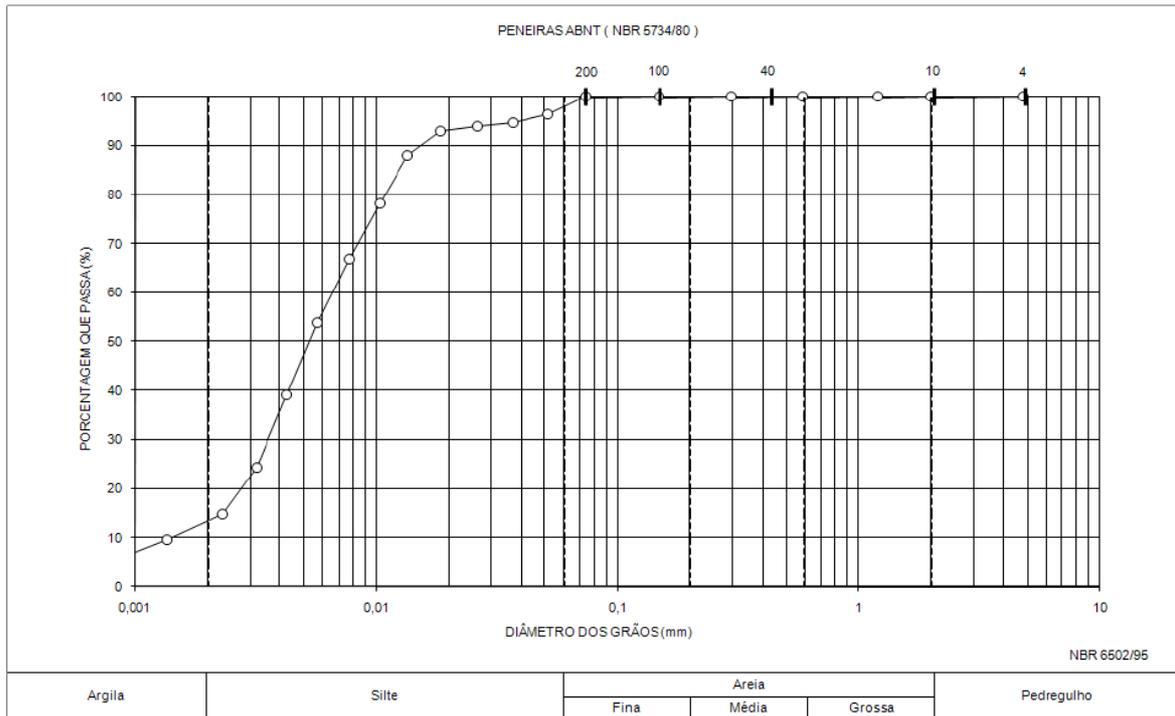
Os resultados de caracterização física dos agregados miúdos e graúdos estão mostrados, respectivamente, na Tabela 27 e Tabela 28.

**Tabela 27: Caracterização física dos agregados miúdos.**

Ensaio		Areia 1	Areia 2
Granulometria (% retida acumulada)	Abertura da peneira (mm)		
	4,76	1,30	0,00
	2,38	4,50	0,00
	1,19	15,50	0,00
	0,60	39,60	0,00
	0,30	73,90	0,40
	0,15	95,60	32,60
Diâmetro máximo característico (mm)		2,40	0,30
Módulo de finura		2,30	0,33
Classificação		Fina	Muito Fina*
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )		2,618	2,642
Massa unitária compactada seca (g/cm <sup>3</sup> )		1,710	1,590
Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )		1,580	1,417
Absorção (%)		0,49	0,41

\*esta areia possui granulometria abaixo da menor classificação disponível na ABNT NBR 7211:2009.

O fíler SM500 utilizado neste estudo possui massa específica igual 2,64 g/cm<sup>3</sup>, grãos passantes na peneira de malha 500 (abertura de 25 µm) e perda ao fogo igual a 0,08%. Pereira (2010) utilizou o mesmo material e realizou a determinação da granulometria por sedimentação (Figura 153). A finura do SM500, na faixa de 2 a 20 µm, é normalmente encontrada em cimentos.



### A.3. Adição Mineral

#### **Massa específica:**

Corresponde à relação entre a massa de uma determinada quantidade de material e o volume ocupado por ela. Para a sílica utilizou-se o mesmo ensaio na determinação da massa específica do cimento, o qual se dá por meio do frasco volumétrico de “Le Chatelier” e segue as especificações da ABNT NBR NM 23:2001 – Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica.

O valor encontrado para a massa específica absoluta da sílica ativa de ferro-silício foi de 2,18 g/cm<sup>3</sup> e a massa específica aparente foi de 0,70 g/cm<sup>3</sup>. A quantidade passante na malha 325 foi de 97,55%. A fabricante, Elkem Materials South America Ltda., indica ainda área superficial específica (BET) mínima de 150.000 cm<sup>2</sup>/g da sílica dispersa, teor de sílica amorfa de 85 a 99 %, carbono de 1 a 6 % e o restante composto de óxidos de ferro, alumínio e magnésio (ELKEM, 2008).

### A.4. Aditivo

#### **Massa específica:**

Resultado fornecido pelos fabricantes.

#### **Teor de sólidos:**

Este ensaio determina a quantidade de sólidos presentes no aditivo em termos de porcentagem da composição total do material. O ensaio seguiu as especificações da NBR 10908:2008 – Aditivos para argamassa e concreto – ensaios de caracterização.

Os aditivos ADVA Cast e Aditivo B utilizados são superplastificantes de 3ª geração a base de policarboxilatos. Os respectivos fabricantes recomendam utilizar as dosagens de 0,2% a 1,0% da massa de cimento e fornecem outras propriedades conforme vistas na Tabela 29.

**Tabela 29: Características dos aditivos avaliados**

	ADVA Cast	Aditivo B
Massa específica	1,08g/cm <sup>3</sup>	1,09g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	31%	30%
Aspecto	Líquido viscoso	Líquido viscoso
Cor	Bege claro	Branco turvo
Viscosidade	Baixa	Baixa

## Apêndice B – Resultados mecânicos detalhados

**Tabela 30: Resistência à compressão, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico complementar.**

Idade (dias)	CP	LC	LDC	LDS	LC-Comp1	LD-Comp1	LC-Comp2	LD-Comp2	LC-Comp3	LD-Comp3
28	1	24,42	28,45	20,62	30,00	33,88	54,27	59,12	59,02	58,01
	2	26,37	28,83	24,79	31,18	34,99	57,95	57,96	58,63	60,53
	média	25,40	28,64	22,70	30,59	34,44	56,11	58,54	58,83	59,27

**Tabela 31: Resistência à compressão, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico.**

Idade (dias)	CP	LC-35	LD-35	LC-50	LD-50	LC-65	LD-65
7	1	35,96	41,22	24,11	31,12	17,12	27,03
	2	34,14	43,92	22,91	28,08	18,10	30,47
	3	33,20	42,26	22,37	29,67	17,85	29,85
	4	36,58	43,80	21,81	30,61	16,37	27,81
	média	34,97	42,80	22,80	29,87	17,36	28,79
28	1	44,59	54,78	30,26	39,11	26,42	35,65
	2	45,23	52,96	31,80	38,73	27,52	36,74
	3	46,86	53,55	30,40	40,01	26,93	35,57
	4	46,88	55,11	29,50	41,95	26,29	37,84
	média	45,89	54,10	30,49	39,95	26,79	36,45
63	1	48,37	56,76	32,98	41,38	28,04	39,46
	2	46,93	55,38	31,47	42,29	29,90	39,87
	3	45,39	55,75	33,51	41,92	29,32	38,20
	4	47,59	57,63	31,32	43,21	31,50	38,51
	média	47,07	56,38	32,32	42,20	29,69	39,01
91	1	48,63	57,73	33,62	45,01	31,39	43,39
	2	49,77	58,09	34,04	43,92	32,30	40,08
	3	49,41	59,17	35,12	44,24	33,55	41,26
	4	50,23	59,93	35,70	42,87	32,96	40,23
	média	49,51	58,73	34,62	44,01	32,55	41,24

**Tabela 32: Resistência à compressão, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.**

Idade (dias)	CP	SC-35	SD-35	SC-55	SD-55	SC-75	SD-75-IP	SD-75-FP
7	1	34,47	35,33	26,78	28,58	16,57	18,37	18,82
	2	29,57	35,23	26,10	25,93	17,32	19,58	18,05
	3	34,79	36,01	27,90	26,04	16,34	19,71	17,56
	4	33,13	34,79	25,86	27,33	18,25	19,62	18,41
	média	32,99	35,34	26,66	26,97	17,12	19,32	18,21
28	1	42,07	47,14	36,04	36,41	27,13	29,95	30,83
	2	44,06	47,41	35,39	37,87	26,49	30,13	31,28
	3	43,45	47,27	36,66	34,59	27,14	30,49	29,80
	4	41,30	46,30	36,48	36,06	26,59	28,57	30,34
	média	42,72	47,03	36,14	36,23	26,84	29,79	30,56
63	1	45,02	51,14	39,68	42,61	32,52	33,71	31,52
	2	48,10	50,58	38,76	42,02	32,13	32,65	35,91
	3	48,44	50,28	41,65	41,15	32,45	33,55	36,20
	4	47,42	47,17	40,02	40,84	32,84	34,16	35,77
	média	47,24	49,79	40,03	41,66	32,49	33,52	34,85
91	1	48,08	52,44	41,85	43,51	34,48	36,71	40,01
	2	46,95	51,53	40,98	45,20	35,94	35,32	38,45
	3	47,92	52,89	39,94	44,07	34,77	35,51	37,96
	4	48,57	50,94	40,67	44,18	34,41	36,26	39,46
	média	47,88	51,95	40,86	44,24	34,90	35,95	38,97

**Tabela 33: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico complementar.**

Idade (dias)	CP	LC	LDC	LDS	LC-Comp1	LD-Comp1	LC-Comp2	LD-Comp2	LC-Comp3	LD-Comp3
28	1	2,09	2,34	2,02	2,04	2,70	3,50	3,48	3,39	3,63
	2	2,26	2,80	2,10	2,58	2,18	3,38	3,50	3,58	3,36
	média	2,18	2,57	2,06	2,31	2,44	3,44	3,49	3,48	3,50

**Tabela 34: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico.**

Idade (dias)	CP	LC-35	LD-35	LC-50	LD-50	LC-65	LD-65
28	1	3,41	3,51	2,41	3,17	2,25	2,89
	2	3,58	3,28	2,67	2,84	2,47	2,77
	3	3,27	3,73	2,80	2,96	2,19	2,75
	média	3,48	3,55	2,65	3,02	2,26	2,80
63	1	3,75	4,13	2,77	3,50	2,64	3,26
	2	3,89	3,88	2,76	3,17	2,24	3,18
	3	3,98	3,91	2,89	2,91	2,48	2,93
	média	3,86	3,94	2,87	3,28	2,49	3,12

**Tabela 35: Resistência à tração por compressão diametral, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.**

Idade (dias)	CP	SC-35	SD-35	SC-55	SD-55	SC-75	SD-75-IP	SD-75-FP
28	1	2,94	2,96	2,30	2,48	2,21	2,20	2,79
	2	2,71	3,07	2,27	2,46	2,09	2,60	2,70
	3	2,77	2,77	2,35	2,69	2,31	2,50	2,39
	média	2,81	2,93	2,31	2,54	2,20	2,43	2,63
63	1	2,99	2,86	2,48	2,68	2,28	2,74	3,53
	2	3,01	3,39	2,55	2,84	2,39	2,54	2,65
	3	2,96	3,10	2,93	3,16	2,65	2,74	3,21
	média	2,98	3,12	2,65	2,89	2,44	2,67	3,13

**Tabela 36: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos corpos de prova de concreto laterítico.**

Idade (dias)	CP	LC-35	LD-35	LC-50	LD-50	LC-65	LD-65
28	1	5,1	7,0	4,1	6,3	3,4	5,2
	2	5,0	7,3	4,1	5,8	3,8	5,8
	3	5,4	6,7	4,4	5,4	3,7	5,4
	média	5,2	7,0	4,2	5,8	3,6	5,5
63	1	6,3	7,6	4,6	6,3	4,3	6,3
	2	6,0	7,9	5,1	6,4	4,0	6,0
	3	6,6	7,6	5,0	6,5	3,9	5,7
	média	6,3	7,7	4,9	6,4	4,1	6,0

**Tabela 37: Resistência à tração na flexão, em MPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.**

Idade (dias)	CP	SC-35	SD-35	SC-55	SD-55	SC-75	SD-75-IP
28	1	5,6	6,8	4,9	4,6	3,8	4,5
	2	5,4	6,8	4,1	4,9	4,3	4,8
	3	5,0	5,5	4,7	5,4	3,9	4,6
	média	5,3	6,4	4,6	5,0	4,0	4,6
63	1	6,3	7,0	5,7	5,8	4,4	4,9
	2	6,5	6,8	5,2	5,3	4,6	4,9
	3	6,5	8,0	5,3	6,1	4,4	5,5
	média	6,4	7,3	5,4	5,7	4,5	5,1

**Tabela 38: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto laterítico.**

Idade (dias)	CP	LC-35	LD-35	LC-50	LD-50	LC-65	LD-65
28	1	43,98	34,65	35,24	31,86	35,33	31,40
	2	41,32	37,34	33,44	29,06	32,10	30,97
	3	41,09	37,06	36,50	28,81	36,70	29,79
	média	42,13	36,35	35,06	29,91	34,71	30,72
63	1	44,78	35,54	36,70	31,26	32,33	28,22
	2	42,07	38,20	34,04	29,78	35,56	32,93
	3	41,67	37,59	35,76	31,48	37,02	31,40
	média	42,84	37,11	35,50	30,84	34,97	30,85

**Tabela 39: Módulo de elasticidade, em GPa, dos corpos de prova de concreto com seixo rolado.**

Idade (dias)	CP	SC-35	SD-35	SC-55	SD-55	SC-75	SD-75-IP	SD-75-FP
28	1	39,67	36,42	37,07	34,17	34,05	32,12	31,54
	2	39,77	37,72	37,85	31,79	33,69	31,18	29,84
	3	38,73	35,17	36,32	32,88	33,49	31,55	32,47
	média	39,39	36,44	37,08	32,95	33,74	31,62	31,28
63	1	41,95	38,07	36,75	30,29	36,19	33,56	33,05
	2	38,31	37,54	38,14	34,99	37,1	32,33	35,76
	3	37,54	38,61	35,77	33,89	34,87	36,05	37,77
	média	40,13	38,07	36,89	33,06	36,05	33,98	35,53

## Apêndice C – Diagramas de dosagem dos concretos estudados

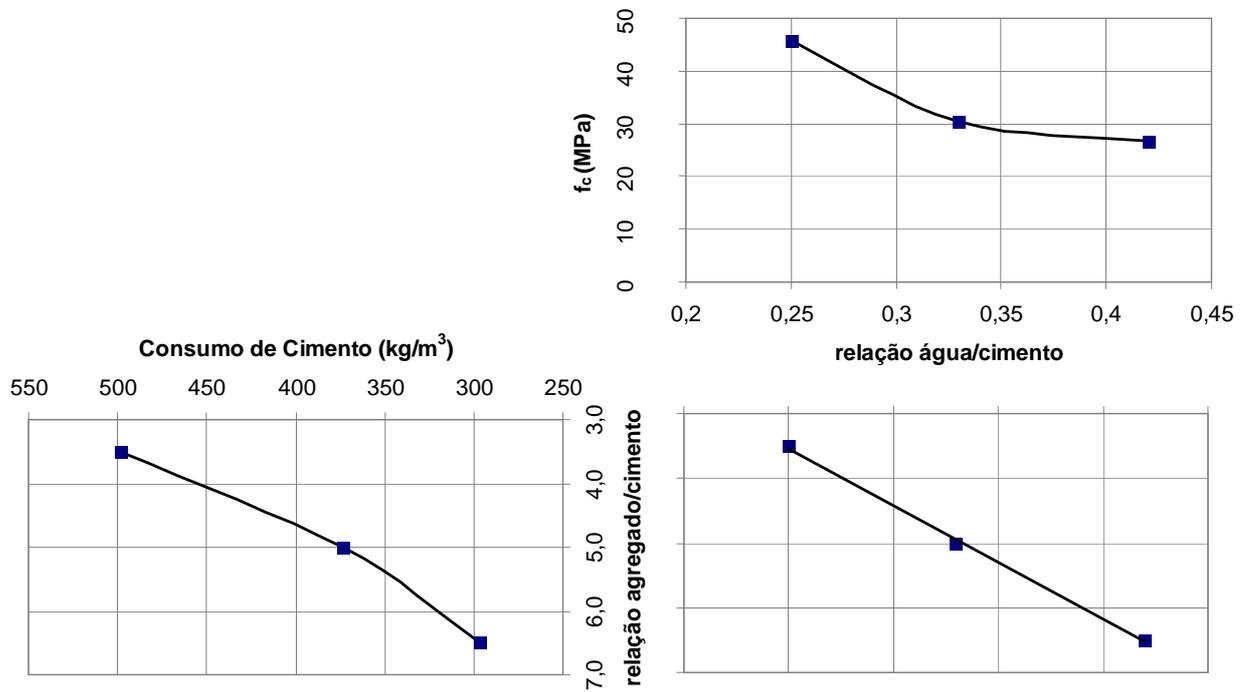


Figura 154: Curva de dosagem para os concretos de referência confeccionados com laterita.

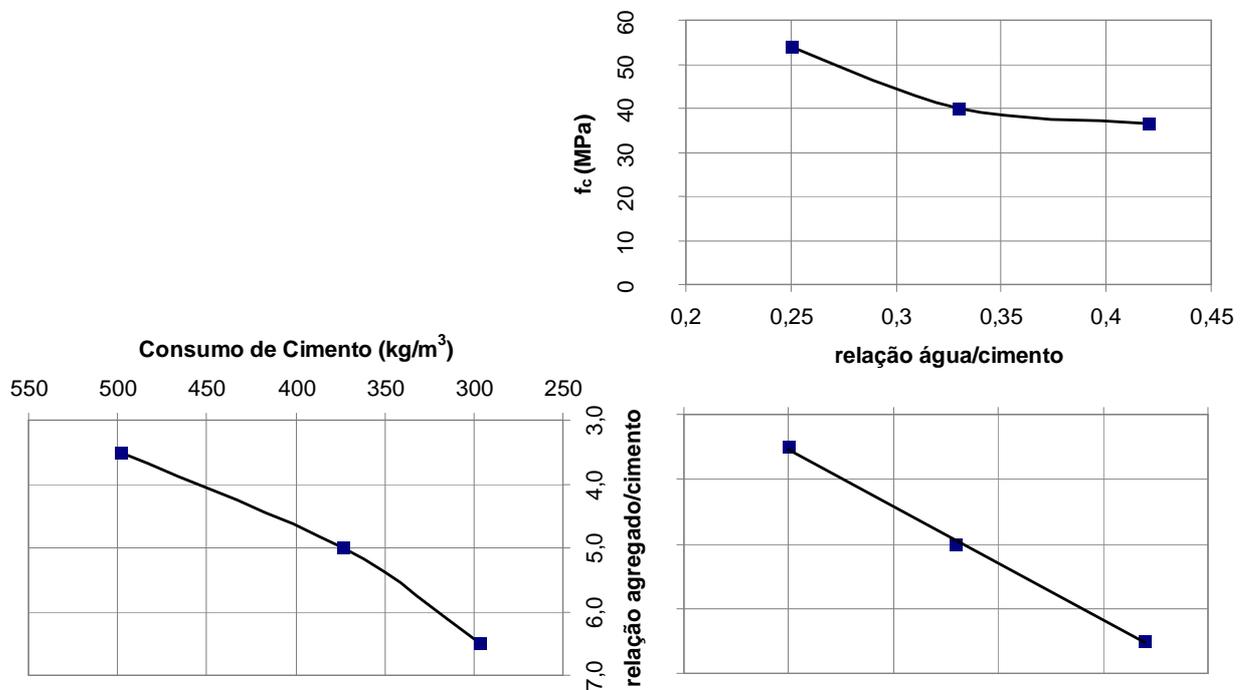


Figura 155: Curva de dosagem para os concretos dopados confeccionados com laterita.

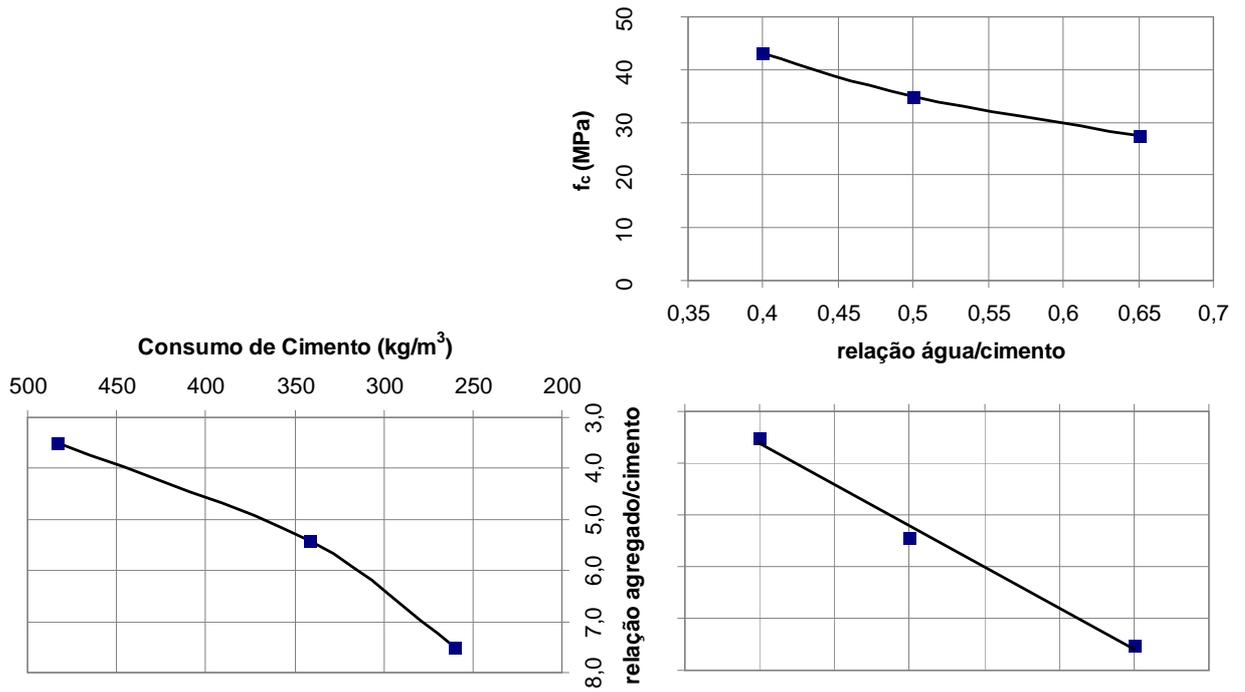


Figura 156: Curva de dosagem para os concretos de referência confeccionados com seixo rolado.

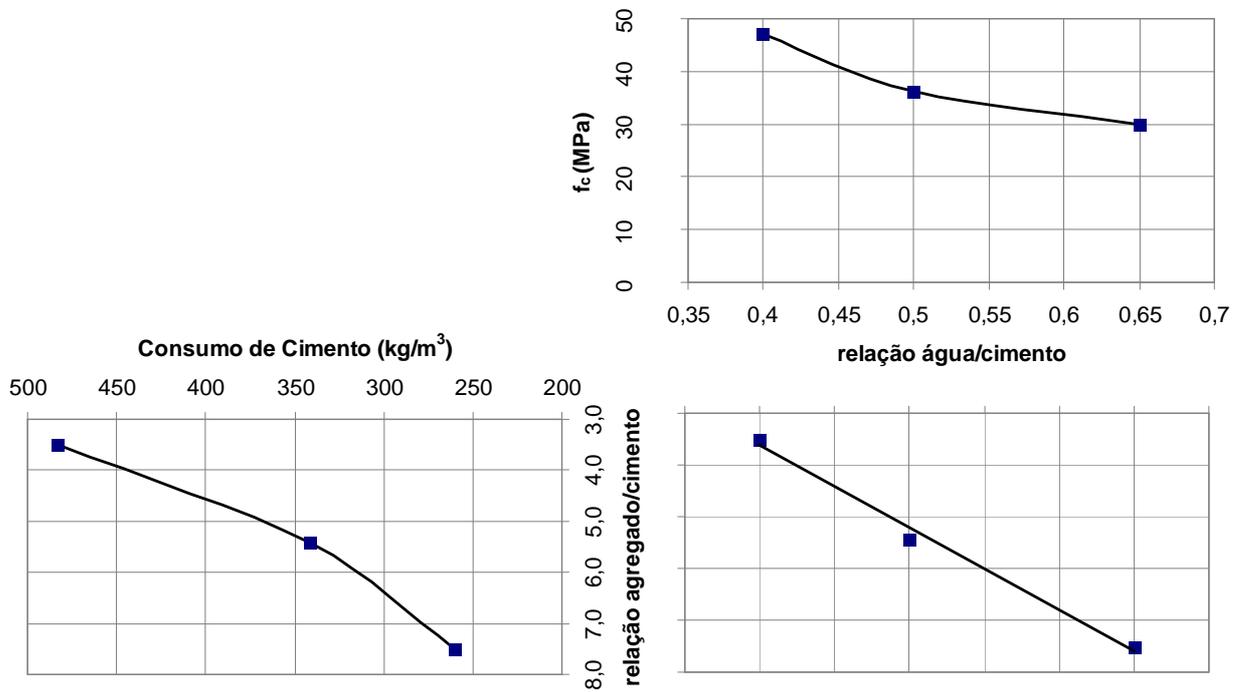


Figura 157: Curva de dosagem para os concretos dopados confeccionados com seixo rolado.