

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

Dissertação de Mestrado

“INFLUÊNCIA DE AREIAS ARTIFICIAIS DE ROCHAS
BRITADAS NA ESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES DE
CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND”

Autor: Rubens José Pedrosa Reis
Orientador: Wander Luiz Vasconcelos

Junho/04

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

Rubens José Pedrosa Reis

INFLUÊNCIA DE AREIAS ARTIFICIAIS DE ROCHAS
BRITADAS NA ESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES DE
CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND

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

Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Wander Luiz Vasconcelos

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2004

A vida não deve terminar como terminam as horas do dia, agonizando em um entardecer. A vida tem que ampliar seus horizontes; fazer longas as horas da existência para que o espírito, incorporado na matéria, experimente a grandiosidade de sua criação. Para isso tem que renovar-se no passado e no futuro. No passado, reproduzindo constantemente na tela mental todas as passagens vividas com maior intensidade; no futuro, pensando no que ainda resta por fazer, naquilo que se pensou fazer, e, sobretudo, no que se quer ser nesse futuro. E quanto mais gratidão o homem experimente pelo passado, quanto mais gratidão guarde pelas horas felizes vividas nele, assim como pelas de luta ou de dor, que sempre são instrutivas, tanto mais abrirá sua vida a novas e maiores perspectivas de realização.

Carlos Bernardo González Pecotche

AGRADECIMENTOS

Procuro guardar para todos aqueles de uma ou outra forma contribuíram para fazer-me mais grata a vida, uma eterna gratidão.

Muitos contribuíram, desde meu ingresso na EEUFMG em 1969 até o presente, na minha formação como homem e como técnico. A estes gostaria de expressar meus agradecimentos:

Aos colegas e contemporâneos da Escola de Engenharia:

- Guilherme Silva Filho: pela oportunidade de colaborar no Grêmio de Engenharia Civil e me tornar seu presidente em 1973;
- Vitor Percival de Andrade: pelo 1º estágio em 1971, no Laboratório de Materiais de Construção do Prof. Mário Fox Drummond;
- Luiz de Lacerda Júnior: pela oportunidade de iniciar no magistério, em 1975, na Faculdade de Engenharia e Arquitetura da FUMEC.

Ao prof. Mário Fox Drummond (in memoriam), ex-aluno e ex-professor da EEUFMG, humanista e profissional renomado, com quem tive a oportunidade de conviver e trabalhar durante 6 anos.

Ao colega e amigo Cláudio Alberto Rigo da Silva, pelo incentivo e oportunidade de conhecer o Prof. Wander.

Ao prof. Wander Luiz Vasconcelos pela paciência, amizade, apoio e segura orientação.

Aos professores da EEUFMG, Abdias Magalhães Gomes, Dagoberto Brandão Santos, Herman Sander Mansur, Maria Teresa Paulino Aguilár e Vicente T. L. Buono pelo apoio e valiosas colaborações.

Aos funcionários da EEUFMG pela dedicação e responsabilidade na realização dos ensaios.

Aos colegas de Mestrado, Carlos Augusto, Juliana, Sônia, Weber, e todos os demais, pela oportunidade de conviver e aprender.

Aos amigos e colaboradores Alexandre B. Ribeiro, Cíntia D. Tolentino e Tatiane R. Costa.

À Consultare, na pessoa do amigo e sócio Otávio Luiz do Nascimento, e seus funcionários (Aníbal, Vinícius, Ricardo, Laércio, Silvano, Glenda, Carlos e outros) pelo trabalho, compreensão e incentivo.

Às empresas ABCP-Associação Brasileira de Cimento Portland, Centralbeton, Concretomix, Furnas S/A – Laboratório de Concreto, Holcim S/A e Supermix, pela imprescindível colaboração.

Aos amigos e colegas Luiz Antônio Melgaço N. Branco e Rodrigo Moyses Costa pelo incentivo e desprendimento em ajudar.

Aos engenheiros Ivan Ramalho de Almeida e Selmo Kuperman pela atenção e valiosas informações.

À Faculdade de Engenharia e Arquitetura da FUMEC, por todo incentivo recebido.

Aos autores de livros e artigos citados na Referência Bibliográfica pelo inestimável trabalho de estudar, pesquisar e informar.

À minha família pelo apoio constante e afetuoso.

A Deus, pela oportunidade de viver, procurando sempre evoluir, neste ambiente maravilhoso que é a Criação.

3.3.2 - Tipos de Agregados	22
3.3.2.1 – Granito	22
3.3.2.2 – Basalto	22
3.3.2.3 – Gnaisse.....	22
3.3.2.4 – Calcário	23
3.3.2.5 – Arenito	23
3.3.2.6 - Escória de alto-forno	24
3.3.2.7 - Hematita	24
3.3.3 - Características dos Agregados e sua Importância.....	26
3.3.3.1 - Massa Específica	26
3.3.3.2 - Absorção e Umidade Superficial.....	26
3.3.3.3 - Resistência à Compressão, Resistência à Abrasão e Módulo Elasticidade.....	27
3.3.3.4 – Sanidade.....	27
3.3.3.5 – Composição granulométrica	27
3.3.3.6 - Forma e Textura das Partículas	28
3.3.3.7 - Composição Química e Mineralógica	32
3.3.3.8 - Reação Álcali-Agregado	33
3.3.4 – Resíduos	35
3.3.4.1 - Adições Minerais.....	36
3.3.4.2 - Finos de Pedras Britadas	36
3.3.4.3 - Entulho de Construção Civil	37
3.3.4.4 - Gestão de Resíduos	39
3.3.5 - Areias Artificiais	41
3.3.5.1 – Introdução	41
3.3.5.2 – Características	43
3.3.5.3 - Mercado de Areia Artificial.....	45
3.3.5.4 - Produção de Areias Artificiais.....	47
3.3.5.4.1 - Desmonte Hidráulico.....	48
3.3.5.4.2 - Britagem das Rochas	49
3.3.6 - A Extração dos Agregados e o Meio Ambiente.....	50

3.3.7 - Exigências ABNT	56
3.3.7.1 - Agregado Miúdo.....	57
3.3.7.2 - Agregado Graúdo	58
3.4 – ADIÇÕES MINERAIS.....	60
3.5 – ADITIVOS QUÍMICOS.....	61
3.6 - ÁGUA	62
3.7 – RESUMO DE PESQUISAS, ARTIGOS PUBLICADOS E UTILIZAÇÕES DA AREIA ARTIFICIAL	63
3.7.1 - Concreto Alta Resistência Com Diferentes Agregados Miúdo	63
3.7.1.1 – Agregados	63
3.7.1.2 - Graduação e características físicas agregados miúdo.....	63
3.7.1.3 - Características misturas	64
3.7.1.4 – Resultados	65
3.7.1.5 – Considerações	65
3.7.2 - Pavimento de Concreto para Aeroporto [REL 1983]	66
3.7.3 - Lafarge/Mineração Brita Brás.....	67
3.7.4. - Areia artificial de basalto no Rio Grande do Sul.....	69
3.7.5. - Pesquisadores produzem areia clonada (areia artificial) no Rio de Janeiro.....	69
3.7.6 - Areias artificiais de calcário em Minas Gerais	70
3.7.7 - Areia artificial de basalto das obras do Complexo Canoas (UHE CESP)	71
3.7.8 - Avaliação qualidade da areia artificial de calcário [REL 162].....	71
4 - PARTE EXPERIMENTAL.....	73
4.1 - MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO	73
4.1.1 - Cimento Portland Composto CP II E32.....	73
4.1.2 - Agregado Miúdo	73
4.1.3 - Agregado Graúdo.....	74
4.2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	75
4.2.1 - Cimento Portland Composto CP II E 32.....	75
4.2.1.1 - Exigências Químicas	75
4.2.1.2 - Exigências Físicas	75

4.2.2 - Agregado Miúdo	76
4.2.3 - Agregado Graúdo.....	76
4.3 - CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS	77
4.4 - PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	77
4.4.1 – Mistura	77
4.4.2 - Adensamento Corpos de Prova.....	79
4.4.3 – Cura	80
4.4.4 - Preparação dos topos dos corpos de prova	80
4.5 - ENSAIOS DOS CONCRETOS	82
4.5.1 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR 7223 (NM 67) ABNT.....	82
4.5.2 - Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – NBR 5738 – ABNT	84
4.5.3 - Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – NBR 5739 – ABNT	84
4.5.4 - Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos- de-prova prismáticos: NBR 12142 (MB 3483), ABNT	84
4.5.5 - Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222, ABNT	85
4.5.6. - Módulo de deformação ou elasticidade	86
4.5.6.1 – Introdução.....	86
4.5.6.2 - Método de Medida do Módulo de Elasticidade Estático (E).....	88
4.5.6.3 - Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ed).....	90
4.6 - CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	92
4.6.1 - Difração de Raios X (DRX).....	93
4.6.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	96
5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
5.1 - CIMENTO PORTLAND CIMINAS CII E32.....	99
5.2 – AGREGADOS.....	101
5.2.1 - Descrição dos Agregados.....	101

5.2.2 - Reatividade Potencial.....	102
5.2.2.1 – Introdução	102
5.2.2.2 - Características Argamassas	102
5.2.2.3 - Ilustração Fotográfica dos Ensaios, conforme Figuras 5.1 a 5.4.....	102
5.2.2.4 – Resultados	103
5.2.2.4.1 - Difração de raios X.....	103
5.2.2.4.1.1 - Areia Artificial de Calcário – Lapa Vermelha.....	103
5.2.2.4.1.2 - Brita N.º 0 de Calcário – Contran Borges	105
5.2.2.4.1.3 - Brita N.º 1 de Calcário – Contran Borges	107
5.2.2.4.2 – Teor de Álcalis Totais e Solúveis do Cimento.....	109
5.2.2.4.3 - Reatividade Potencial Álcali-Agregado	109
5.2.2.5 – Considerações	110
5.2.3 - Agregados Miúdo	112
5.2.4 – Agregados Graúdo	114
5.3 - CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS DOS CONCRETOS.....	116
5.4 - QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA MOLDADOS E RELAÇÃO DE ENSAIOS.....	119
5.5 - LABORATÓRIOS PARTICIPANTES DA PESQUISA.....	121
5.6 - RESULTADOS ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	121
5.6.1 - Consistência (slump), teor de ar incorporado (AI) e densidade.....	121
5.6.2 - Compressão, tração e módulo de elasticidade	122
5.7 - DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	136
5.7.1 - Areia Quartzosa Natural	137
5.7.2 - Areia artificial de gnaïsse.....	138
5.7.3 - Areia artificial de calcário.....	138
5.7.4 - Brita de calcário	139

5.7.5 - Concreto Mistura A (100N)	139
5.7.6 - Concreto Mistura D (40N + 60G).....	140
5.7.7 - Concreto Mistura F (100 G).....	140
5.7.8 - Concreto Mistura I (40N + 60C).....	141
5.7.9 - Concreto Mistura L (100 C).....	141
5.8 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	142
5.8.1 - Areia Quartzosa Natural	144
5.8.2 - Areia Artificial de Gnaïsse.....	146
5.8.3 - Areia Artificial de Calcário.....	147
5.8.4 - Brita de Calcário	148
5.8.5 - Concreto Mistura A (100N)	149
5.8.6 - Concreto Mistura D (40N + 60G).....	150
5.8.7 - Concreto Mistura F (100G).....	151
5.8.8 - Concreto Mistura I (40N + 60C).....	152
5.8.9 - Concreto Mistura L (100C).....	154
5.9 – O ENGENHEIRO E O MEIO AMBIENTE	155
6 – CONCLUSÃO	156
6.1 – BENEFICIAMENTO DOS AGREGADOS MIÚDO	156
6.2 – FORMA DOS AGREGADOS	156
6.3 – REATIVIDADE POTENCIAL DOS AGREGADOS	157
6.4 – PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	157
6.5 - PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	157
6.6 - ESTRUTURA DA ZONA DE TRANSIÇÃO DOS CONCRETOS.....	158
6.7 - DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	158
6.8 – INFLUÊNCIA DO TIPO DE AGREGADO MIÚDO (AREIA BRITADA DE GNAÏSSE E DE CALCÁRIO) NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS CONCRETOS	158
6.9 – COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDO	159
6.10 - MEIO AMBIENTE	160
6.11 - CONCLUSÕES FINAIS.....	160
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Seção polida de um corpo-de-prova de concreto.....	9
Figura 3.2: Forma e textura da superfície de partículas de agregado graúdo	31
Figura 3.3: Extração Areia Quartzosa Natural	50
Figura 3.4: Extração Areia Quartzosa Natural	51
Figura 3.5: Extração Areia Quartzosa Natural	51
Figura 3.6: Desenvolvimento da resistência à compressão.....	68
Figura 4.1: Betoneira eixo inclinado, capacidade 320 litros	78
Figura 4.2: Adensamento dos corpos de prova cilíndricos 100x200 mm.....	79
Figura 4.3: Adensamento dos corpos de prova cilíndricos 150x300 mm.....	79
Figura 4.4: Adensamento dos corpos de prova cilíndricos 150x300 mm.....	80
Figura 4.5: Retífica dos corpos-de-prova cilíndricos.....	81
Figura 4.6: Capeamento dos corpos-de-prova cilíndricos	81
Figura 4.7: Sequência de procedimento para medida do abatimento (Slump)	83
Figura 4.8: Ensaio de tração por flexão (carregamento no terço médio).....	84
Figura 4.9: Princípio do ensaio da resistência à tração por compressão diametral.....	85
Figura 4.10: Curva típica de concreto submetida a um único carregamento	87
Figura 4.11: Prensa universal de ensaios EMIC – PC200, computadorizada, utilizada na determinação do módulo de elasticidade estático	89
Figura 4.12: Conjunto de aparelhos para determinação da frequência fundamental	91
Figura 4.13: Esquema de medições das frequências fundamentais de vibração.....	92
Figura 4.14: Representação esquemática tubo de raios – X	94
Figura 4.15: Difracao de raios X em um cristal	95
Figura 4.16: Processos de interações possíveis durante a incidência de um feixe de elétrons em uma amostra sólida.....	97
Figura 5.1: Reatividade potencial dos agregados: conjunto de tanques.....	102
Figura 5.2: Reatividade potencial dos agregados: vista interna do tanque	102
Figura 5.3: Reatividade potencial dos agregados: retirada da barra	103
Figura 5.4: Reatividade potencial dos agregados: leitura / relógio digital.....	103
Figura 5.5: DRX: difratograma 4.1-1 - Areia de Calcário – Lapa Vermelha	104
Figura 5.6: DRX: Difratograma 4.1-2 – Brita nº 0 de Calcário	106

Figura 5.7: DRX: Difratoograma 4.1-3 – Brita nº 1 de Calcário	108
Figura 5.8: Reatividade Potencial - Agregados em Combinação com Cimento do Tipo CP I de Alto Teor de Álcalis	110
Figura 5.9: Gráfico: Composição granulométrica concreto A (100N) x curva granulométrica de Bolomey ($D_{máx} = 19\text{mm}$)	119
Figura 5.10: Superfície de fratura de corpos de prova prismáticos.....	128
Figura 5.11: Compressão (f_c): gráfico, resultados médios nas idades de 3 dias, 7 dias e 28 dias	129
Figura 5.12: Tração por compressão diametral (f_{tD}): gráfico, resultados médios nas idades de 7 dias e 28 dias.....	129
Figura 5.13: Tração na flexão (f_{ctM}): gráfico, resultados médios nas idades de 7 dias e 28 dias	130
Figura 5.14: Módulo de elasticidade dinâmico (E_d): gráfico, resultados médios na idade de 28 dias	130
Figura 5.15: Módulo elasticidade estático (E): gráfico, resultados médios nas idades de 7 dias e 28 dias.....	131
Figura 5.16: DRX: Areia quartzosa natural	136
Figura 5.17: DRX: Areia artificial de gnaiss.....	137
Figura 5.18: DRX: Areia artificial de calcário.....	137
Figura 5.19: DRX: Brita de calcário	138
Figura 5.20: DRX: Concreto Mistura A (100 N).....	138
Figura 5.21: DRX: Concreto mistura D (40N + 60G)	139
Figura 5.22: DRX: Concreto Mistura F (100 G).....	139
Figura 5.23: DRX: Concreto mistura I (40N + 60C)	140
Figura 5.24: DRX: Concreto mistura L (100 C)	140
Figura 5.25: • MEV: areia quartzosa natural.....	143
Figura 5.26: EDS: areia quartzosa natural (análise do grão)	144
Figura 5.27: • MEV: areia artificial de gnaiss	145
Figura 5.28: • MEV: areia artificial de calcário	146
Figura 5.29: • MEV: brita de calcário	147
Figura 5.30: • MEV: concreto mistura A (100N)	148
Figura 5.31: • MEV: concreto mistura D (40N + 60G)	149

Figura 5.32: • MEV: concreto mistura F (100 G)	150
Figura 5.33: • MEV: concreto mistura I (40N + 60C)	151
Figura 5.34: • MEV: concreto mistura L (100 C)	153

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1	Óxidos presentes no clínquer, abreviações e limites aproximados de composição	18
Tabela III.2	Principais compostos do clínquer e abreviações	18
Tabela III.3	Características compostos cimentos.....	19
Tabela III.4	Tipos e constituição dos cimentos Portland normatizados no Brasil	20
Tabela III.5	Resistência compressão e módulo de elasticidade de concretos, com traços similares, e agregados graúdos diferentes	25
Tabela III.6	Composição média do entulho de São Carlos em 1985	38
Tabela III.7	Denominações de agregados miúdos originários do britamento de rochas	42
Tabela III.8	Composições granulométricas de finos de pedras, areia britada e areia artificial.....	43
Tabela III.9	Estimativa Produção Areia Artificial	46
Tabela III.10	Zonas NBR 7211 Agregado Miúdo	57
Tabela III.11	Zonas NBR 7211 Agregado Graúdo	59
Tabela III.12	Gradação e características físicas dos agregados finos	64
Tabela III.13	Proporções das Misturas	64
Tabela III.14	Tração por compressão diametral (MPa)	65
Tabela III.15	Tração por compressão (MPa)	65
Tabela III.16	Resumo Resultados	67
Tabela III.17	Avaliação qualidade de areia artificial de calcário [REL 162]	72
Tabela IV.1	Composições das Areias	73
Tabela IV.2	Granulometria Teórica	74
Tabela IV.3	Ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura	78
Tabela V.1	Características Físicas e Químicas do Cimento	100
Tabela V.2	Descrição, procedência e local de coleta dos agregados.....	101
Tabela V.3	Composição das areias	101
Tabela V.4	Álcalis Totais e Solúveis em Água	109
Tabela V.5	Classificação Agregados Norma ASTM C 1260/01 e Limites por Shayan	111

Tabela V.6	Composição granulométrica – NBR 7217	113
Tabela V.7	Características físicas	113
Tabela V.8	Determinação da forma dos agregados miúdo	114
Tabela V.9	Composição granulométrica – NBR 7217	115
Tabela V.10	Características físicas	115
Tabela V.11	Parâmetros Constantes dos Traços	116
Tabela V.12	Características misturas dos concretos	117
Tabela V.13	Composição granulométrica da mistura cimento e agregados, concreto A (100N), e composição ideal segundo Bolomey	118
Tabela V.14	Relação de corpos de prova moldados e ensaios	120
Tabela V.15	Relação laboratórios participantes da pesquisa	121
Tabela V.16	Resultados de consistência (Slump) inicial, após mistura (15min e 30 min); AI (ar incorporado) e densidade	122
Tabela V.17	Resultados Ensaios Compressão	124
Tabela V.18	Resultados Ensaios Tração Simples	125
Tabela V.19	Resultados Ensaios Tração na Flexão	126
Tabela V.20	Resultados Ensaios Módulo Elasticidade	127
Tabela V.21	Correlação entre resistências e módulos, idade 28 dias	132
Tabela V.22	Correlações entre resultados de ensaios de compressão, tração e módulo elasticidade, idade de 28 dias e estimativas ACI	135
Tabela V.23	Composição mineralógica dos agregados	136

LISTA DE NOTAÇÕES

σ = desvio padrão

v = coeficiente de variação

a/c = relação água / cimento em massa

$D_{\text{máx}}$ = dimensão máxima característica

E = módulo de elasticidade estático

E_d = módulo de elasticidade dinâmico

f_c = resistência à compressão

f_{ck} = resistência característica à compressão

$f_{ck, \text{est}}$ = resistência característica estimada compressão

f_{ctM} = resistência à tração na flexão

f_{tD} = resistência à tração por compressão diametral

$f_{tk, \text{est}}$ = resistência característica estimada tração

HPC = high-performance concrete

MF = módulo de finura

100N = 100% de areia natural

80N + 20G = 80% areia natural + 20% areia de gnaisse

60N + 40G = 60% areia natural + 40% areia de gnaisse

40N + 60G = 40% areia natural + 60% areia de gnaisse

20N + 80G = 20% areia natural + 80% areia de gnaisse

100G = 100% areia de gnaisse

80N + 20C = 80% areia natural + 20% areia de calcário

60N + 40C = 60% areia natural + 40% areia de calcário

40N + 60C = 40% areia natural + 60% areia de calcário

20N + 80C = 20% areia natural + 80% areia de calcário

100C = 100% areia de calcário

RESUMO

Foram feitas onze misturas de concreto, com as seguintes características: consumo de cimento: 350 kg/m^3 ; relação água/cimento: 0,54; consistência (Slump): $(70 \pm 10)\text{mm}$; teor argamassa em relação ao total de materiais secos no concreto: $(46 \pm 1)\%$; proporção de areia artificial (de gnaiss e calcário) em relação à areia quartzosa de rio: 0, 20, 40, 60, 80 e 100 %; idades, dos concretos, para ensaios: 3 dias, 7 dias e 28 dias. Avaliou-se as características dos agregados e dos concretos nos estados fresco (trabalhabilidade) e endurecido: compressão axial, tração (por compressão diametral e na flexão), módulo de elasticidade (elástico e dinâmico), caracterização microestrutural (MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura) e análise mineralógica (DRX: Difração de Raios X). Os resultados principais foram os seguintes: areia natural e areia de gnaiss com comportamento lentamente reativo; concretos com boa trabalhabilidade; aumento de 14,3% na resistência à tração por compressão diametral (f_{tD}) e 19,6% na resistência à tração na flexão (f_{ctM}), em misturas de concreto com areia artificial de rochas britadas, relativamente à mistura de concreto com areia natural; na microscopia eletrônica de varredura (MEV), nota-se contato íntimo entre a calcita e a pasta de cimento hidratado.

ABSTRACT

Eleven series of concrete mixtures were made, with the following characteristics: cement content: 350 kg/m^3 ; water-cement ratio: 0,54; slump: $70 \pm 10 \text{ mm}$; mortar ratio in relation to the total of dry materials in concrete: $(46 \pm 1)\%$; replacement of natural sand by crushed stone sand (gneiss and limestone), percent by weight: 0, 20, 40, 60, 80 and 100; concrete ages: 3, 7 and 28 days. In this research, the characteristics of aggregates and concrete (fresh and hardened) were analyzed, under some aspects: compressive strength, splitting tensile strength, flexural tensile strength, elastic modulus (elastic and dynamical), microstructure characterization by scanning electron microscopy (SEM) and mineralogical analysis (X-ray diffraction). It sands natural and gneiss sand with behavior slowly reagent; concrete with good workability; increase of 14,3% in the splitting tensile strength for diametrical compression (ftD) and 19,6% in the flexural tensile strength (fctM), in concrete mixtures with artificial sand of aggregates, relatively to the concrete mixture with natural sand; in the scanning electron microscopy (SEM), it is noticed intimate contact between the calcium carbonate and the paste of moisturized cement.

1 INTRODUÇÃO

O Concreto de Cimento Portland é constituído em grande parte por agregados, miúdo e graúdo, na proporção média, em volume, de aproximadamente 70%, tendo os agregados influência significativa nas propriedades do concreto como: resistência mecânica, trabalhabilidade (facilidade de emprego quando fresco), estabilidade dimensional e durabilidade, além de ter um papel fundamental no custo.

Os agregados miúdos quartzosos, naturais, estão cada vez mais escassos nos grandes centros urbanos, devido aos seguintes fatores:

- aumento do consumo;
- expansão urbana, ocupando antigas zonas produtoras de areia, deslocando a extração para regiões cada vez mais distantes, com aumento nos custos de operação e transporte;
- Maior conscientização ambiental do ser humano, que busca cada vez mais resgatar suas dívidas para com a natureza, respeitando seus rios, suas florestas e tudo que interfere no equilíbrio ambiental.

A qualidade desses agregados miúdos naturais, em termos de uniformidade granulométrica, teores de material pulverulento e argila em torrões, tem comprometido negativamente a qualidade dos concretos, impulsionando os consumidores (construtoras, concreteiras, etc..) na busca de soluções técnicas e econômicas para melhorar a qualidade dos concretos.

O uso de areia artificial de rochas britadas tem se tornado uma solução para o problema de insuficiência de agregados miúdos naturais de qualidade e da necessidade de aumentar a resistência à tração do concreto com recursos tecnológicos e não com o aumento no consumo de cimento por metro cúbico de concreto, solução que causa maior incidência de fissuras e aumento no custo do concreto.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da utilização de Areias Artificiais de Rochas Britadas, de Calcário e Gnaisse, nas propriedades do concreto, nos estados fresco (trabalhabilidade) e endurecido: compressão axial, tração (por compressão diametral e na flexão), módulo de elasticidade (elástico e dinâmico), caracterização microestrutural (MEV: Microscopia Eletrônica Varredura) e análise mineralógica (DRX: Difração Raios X).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

3.1.1 Introdução

O material fabricado mais produzido recentemente é o Concreto de Cimento Portland [MEH 1994]. Ele oferece propriedades adequadas a um baixo custo combinado com os benefícios ecológicos e de economia de energia para a maioria das aplicações, sendo assim, julgando pelas tendências mundiais, o futuro do concreto parece ser ainda muito mais promissor.

Apesar da aparente simplicidade o concreto possui uma estrutura altamente complexa, sendo que as relações estrutura-propriedade, geralmente úteis para o entendimento e controle das propriedades dos materiais, não podem ser facilmente aplicáveis. O concreto contém uma distribuição heterogênea de muitos componentes sólidos, assim como vazios de várias formas e tamanhos que podem estar completa ou parcialmente cheios de solução alcalina. Métodos analíticos da ciência dos materiais e da mecânica dos sólidos que funcionam bem com materiais manufaturados relativamente homogêneos e muito menos complexos como aço, os plásticos e as cerâmicas em geral, não se mostram muito efetivos com o concreto.

Comparado com outros materiais a estrutura do concreto não é uma propriedade estática. Isto é porque dois dos três componentes da estrutura – a pasta de cimento e a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento – continuam a se modificar com o tempo. Neste aspecto, o concreto se assemelha à madeira e outros sistemas vivos. De fato, a palavra concreto vem do latim “concretus”, que significa crescer. A resistência e outras propriedades do concreto dependem dos produtos de hidratação do cimento, que continuam a se formar por muitos anos. Embora os produtos sejam relativamente insolúveis podem se dissolver vagarosamente e se recristalizar em ambientes úmidos, permitindo que o concreto sele suas microfissuras.

Com uma estrutura altamente complexa e modificável com o tempo, o concreto ao contrário de outros materiais que são entregues em sua forma final, é frequentemente manufaturado no canteiro de obras.

3.1.2 Características e Propriedades

O concreto hidráulico é um material de construção formado pela mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes (areia, brita, etc.), água, aditivos químicos (plastificante, retardador de pega, etc.) e adições (sílica ativa, etc.)

Baseado na massa específica, o concreto pode ser classificado em três grandes categorias. O concreto contendo areia e seixo rolado natural ou pedra britada, geralmente pesando 2400 kg/m^3 é chamado “concreto de peso normal” ou “concreto corrente” e é mais usado geralmente para peças estruturais. Para aplicações em que se deseja uma alta relação resistência/peso, é possível reduzir a massa específica do concreto, usando-se certos agregados naturais ou processados termicamente que possuem baixa densidade. O termo “concreto leve” é usado para concreto cuja massa é menor que 1800 kg/m^3 . Por outro lado, “concretos pesados”, usados às vezes na blindagem de radiações, é o concreto produzido a partir de agregados de alta densidade e que geralmente pesa mais do que 3200 kg/m^3 .

A classificação do concreto quanto à resistência, predominante na Europa e em muitos outros países, não é usada nos Estados Unidos. Entretanto, do ponto de vista das diferenças nas relações estrutura-propriedade, é útil dividir o concreto em três categorias gerais, baseadas na resistência à compressão, referida a 28 dias:

- Concreto de baixa resistência: resistência à compressão menor que 20 MPa.
- Concreto de resistência moderada: resistência à compressão de 20 MPa a 40 MPa.
- Concreto de alta resistência: resistência à compressão superior a 40 MPa.

Conforme [MEH 1994], há inúmeros concretos modificados que são denominados especificamente pelo nome: concreto reforçado com fibras, concreto com cimento

expansivo e concreto modificado com látex.

[PET 1978] cita outros tipos de concretos, os chamados concretos especiais: com ar incorporado, massa, coloidais (ou injetados a vácuo) e refratários.

Conforme [MEH 1994], a resistência do concreto é a propriedade mais valorizada pelos engenheiros projetistas e de controle de qualidade. Nos sólidos existe uma relação, fundamental, inversa entre porosidade (fração de volume de vazios) e resistência. Conseqüentemente, em materiais de várias fases como o concreto, a porosidade de cada componente ou fase de sua estrutura pode se tornar um fator limitante da resistência. Os agregados naturais são geralmente densos e resistentes; portanto, a porosidade da matriz, que é a pasta de cimento endurecido, bem como a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo é que normalmente determinam a característica de resistência dos concretos usuais.

Embora o fator água/cimento seja o mais importante na determinação de ambas porosidades, da matriz e da zona de transição, e conseqüentemente da resistência do concreto, fatores como adensamento, condições de cura (grau de hidratação do cimento), dimensões e mineralogia do agregado, aditivos, geometria e condições de umidade do corpo de prova, tipo de tensão, e velocidade de carregamento pode também ter um efeito importante sobre a resistência.

A resistência à compressão axial é normalmente aceita como um índice geral de resistência do concreto, principalmente na idade de 28 dias. Entretanto, realizam-se outros tipos de ensaios, para avaliação do comportamento de estruturas de concreto, como por exemplo:

- tração (compressão diametral);
- tração (flexão);
- módulo de elasticidade dinâmico;
- módulo de elasticidade estático.

Elia Alonso [ELI 2002], em trabalho de pesquisa, publicado em *Cement And Concrete Research* 32 (2002), sobre “Propriedades mecânica do concreto elaborado com agregados ígneos”, estudou quatro misturas de concreto, com as seguintes características e resultados:

- Cimento Portland Tipo I foi usado para preparar quatro diferentes misturas: duas com cascalho vulcânico intrusivo britado (tipo granito) com e sem aditivo acelerador; e duas com cascalho vulcânico extrusivo britado (tipo basalto) com e sem superplastificante;
- Como agregado miúdo: areia vulcânica, similar rochas extrusivas ígneas;
- Consumo cimento: 350 kg/m³;
- Relação a/c: 0,57 e 0,52 (concreto com superplastificante).

Ensaio realizados:

- resistência compressão (compressive strength) (f_c);
- tração, compressão diametral (splitting tensile strength) (f_T);
- tração na flexão (modulus of rupture) (M_R);
- módulo de elasticidade dinâmico (dynamical elastic modulus) (E_d);

Relação ensaios, obtidos dos resultados, em kgf/cm²:

$$\bullet \quad f_T = 0,10 f_c; \quad (3.1)$$

$$\bullet \quad M_R = 0,12 f_c; \quad (3.2)$$

$$\bullet \quad E_d = 17.700 \times (f_c)^{0,5}; \quad (3.3)$$

[CET 1998] cita equações empíricas relacionando o módulo de elasticidade estático (E_C) e a resistência à tração na flexão (f_r), com a resistência à compressão (f'_c), conforme ACI:

$$\bullet \quad E_c = 4730 (f'_c)^{0,5}, \text{ MPa}; \quad (3.4)$$

(ACI 318; concreto convencional; $f'_c < 41,3$ MPa)

- $E_c = 3320 (f'_c)^{0,5} + 6890$, MPa; (3.5)

(ACI 363; concreto alto desempenho; $41,3 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 82,7 \text{ MPa}$)

- $f_r = k (f'_c)^{0,5}$; (3.6)

(ACI 363: $k=970$; ACI 318; $k=620$; f_r em KPa e f'_c em MPa)

Jin-Keun Kim et al [KIM 2002] estudaram as relações entre resistência à compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral, considerando a temperatura de cura, idade e tipo de cimento.

3.1.3 Fatores que Influenciam a Qualidade do Concreto

A qualidade do concreto dependerá primeiramente da qualidade dos materiais componentes [PET 1978].

Para a obtenção de concretos com qualidade, facilidade de emprego quando fresco, resistência mecânica, durabilidade, impermeabilidade e constância de volume depois de endurecido, sempre tendo em vista o fator econômico, são necessários:

3.1.3.1 Seleção Cuidadosa dos Materiais (Cimento, Agregados, Água e Aditivos)

- tipo e qualidade
- uniformidade

3.1.3.2 Proporcionamento Correto

- do aglomerante em relação ao inerte
- do agregado miúdo em relação ao agregado graúdo
- quantidade de água em relação ao material seco
- do aditivo em relação ao aglomerante ou água utilizada

3.1.3.3 Manipulação Adequada

- mistura
- transporte
- lançamento
- adensamento
- cura

3.1.4 A Estrutura do Concreto

As relações estrutura-propriedade constituem a essência da moderna ciência dos materiais. O concreto tem uma estrutura muito complexa e heterogênea. Portanto, é muito difícil estabelecer modelos exatos, a partir dos quais o comportamento do material pode ser previsto com segurança. Todavia, um conhecimento da estrutura e das propriedades de cada constituinte do concreto e a relação entre elas é útil para se exercer um certo controle sobre as propriedades do material [MEH 1994].

A resistência do concreto e outras propriedades depende muito de sua microestrutura. A microestrutura do concreto depende de vários parâmetros tais como tipo, quantidade e estrutura dos materiais constituintes [GIL 1993], [ERD 1997], apud. [YAS 2003].

Materiais constituintes incluem agregado graúdo e argamassa. A estrutura do concreto é bastante influenciada pela velocidade de hidratação e reação, tipo de hidratação ou produtos formados na reação e a distribuição destes na pasta de cimento hidratado. É bem conhecido que a velocidade de hidratação e reação e os resultados da hidratação podem ser substancialmente modificados pelo uso de aditivos químicos [NAI 1998], [GIL 1993], [ERD 1997], apud. [YAS 2003].

As propriedades de um material têm origem na sua estrutura interna e podem ser modificadas por mudanças adequadas na estrutura do material. O tipo, a quantidade, a forma e a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua estrutura.

No exame de uma seção transversal do concreto (Figura 3.1) os dois microconstituintes podem ser facilmente distinguidos, são partículas de agregado de tamanho e formas variadas, e o meio ligante, composto de uma massa contínua da pasta endurecida. A nível macroscópico, conseqüentemente, o concreto pode ser considerado como um material biconstituído, consistindo de partículas de agregado dispersa em uma matriz de cimento.

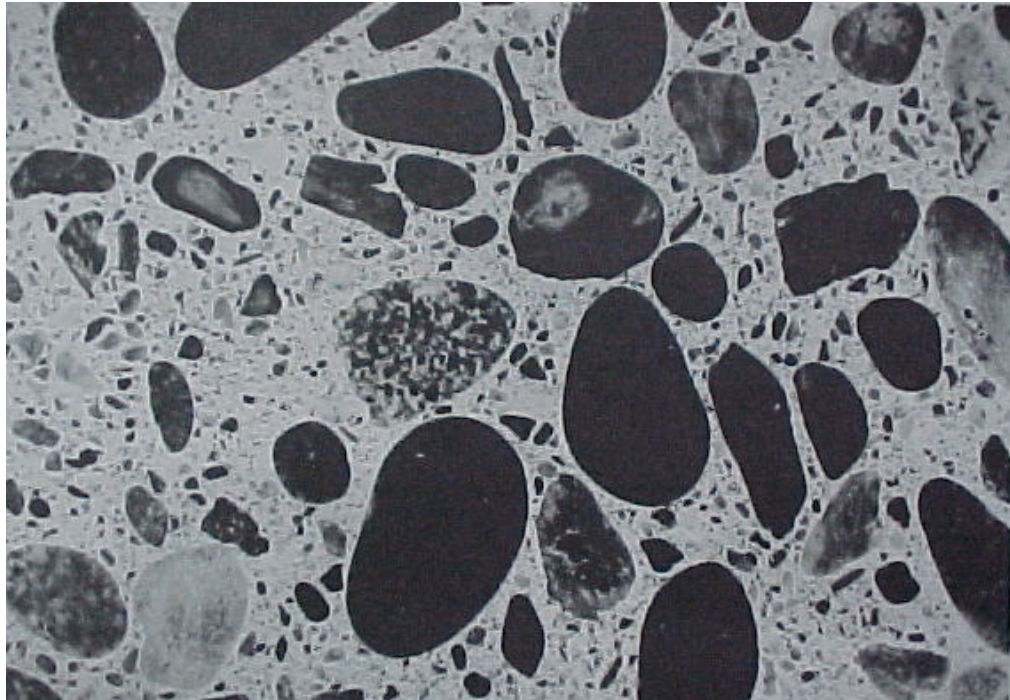


Figura 3.1 Seção polida de um corpo-de-prova de concreto

Fonte: Mehta, Monteiro (1994)

[AIT 2000], no seu livro de concreto de alto desempenho, afirma que o concreto pode ser considerado como um material não-homogêneo composto de três regiões separadas:

- a pasta de cimento hidratada;
- a zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento hidratada;
- os agregados (que podem, eles mesmos, ser policristalinos, como é o caso do granito).

3.1.4.1 Estrutura da Pasta de Cimento

Considerando a pasta de cimento hidratada (C-S-H) como material cristalino de uma única fase, sua resistência mecânica depende de sua porosidade (número e tamanho dos poros).

[AIT 2000] considera que a pasta de cimento hidratada pode ser melhorada dedicando-se maior atenção aos seguintes parâmetros:

- porosidade: um grande número de poros grandes ou vazios (diâmetro $> 50\mu\text{m}$), especialmente concentrados em um local, reduz a resistência;
- tamanho dos grãos: em geral a resistência de uma fase cristalina aumenta com a diminuição do tamanho do grão;
- heterogeneidade: com materiais multifásicos, as heterogeneidades podem originar perdas de resistência.

Para melhorar a resistência das pastas de cimento hidratado, é necessário trabalhar sobre a microestrutura da pasta nesses três níveis.

3.1.4.2 Estrutura Zona de Transição

a) Significado da Zona de Transição

Já se perguntou porque:

- O concreto é frágil sob tração, mas dúctil em compressão?
- Os constituintes do concreto quando ensaiados separadamente à compressão uniaxial permanecem elásticos, até a ruptura, enquanto o concreto mostra comportamento elasto-plástico?
- A resistência à compressão de concreto é maior que a sua resistência à tração de uma ordem de magnitude?

- Para um dado teor de cimento, uma relação água/cimento e idade de hidratação, a argamassa de cimento será sempre mais resistente do que o concreto correspondente?
- E que também a resistência do concreto diminui com o aumento do tamanho do agregado graúdo?
- A permeabilidade de um concreto, mesmo contendo um agregado muito denso será maior por uma ordem de magnitude do que a permeabilidade da pasta de cimento correspondente?
- Por exposição ao fogo, o módulo de elasticidade de um concreto cai mais rapidamente do que a sua resistência à compressão?

As respostas às estas e outras questões enigmáticas sobre o comportamento do concreto encontram-se na zona de transição que existe entre as partículas grandes de agregado e a pasta. Embora constituída dos mesmos elementos que a pasta, a estrutura e as propriedades da zona de transição diferem das da matriz da pasta. Conseqüentemente, é desejável tratar a zona de transição como uma fase distinta da estrutura do concreto [MEH 1994].

b) Resistência da Zona de Transição

A ligação cimento-agregado tem papel fundamental nas propriedades do concreto.

Segundo [COU 1998], como acontece em qualquer fenômeno de contato, como por exemplo cimento-agregado, podem-se considerar vários tipos de ligação entre as duas fases sólidas:

b.1) Ligação mecânica, em escala macroscópica, por rugosidade superficial do agregado na qual os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas, muito maiores, da superfície dos materiais aglomerados.

b.2) Aderência devida à absorção, pelo agregado, de água contendo parte do ligante dissolvido, o qual, após penetrar na superfície da partícula, cristaliza ao mesmo tempo que a pasta, ligando-se a ela.

b.3) Atração, sem continuidade da estrutura, entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, por forças de van der Waals; é uma ligação de tipo puramente físico.

b.4) Continuidade da estrutura cristalina do agregado nos produtos da hidratação do cimento, por crescimento epitáxico com ou sem formação de soluções sólidas intermediárias. É uma espécie de ligação na qual os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongam os do agregado, com os quais têm em comum as suas redes cristalinas. Este tipo de aderência constitui um fenômeno de epitáxia particular: resulta do aparecimento dum modo de ligação regular entre cristais de espécies diferentes, fenômeno bem conhecido na mineralogia e na metalurgia.

b.5) Aderência de origem química, devida a reações entre os produtos da hidratação do cimento e a superfície do agregado.

Aykut Cetin [CET 1998], em trabalho publicado no ACI, “Concreto Alto Desempenho: Influência dos Agregados Graúdo sobre Propriedades Mecânicas”, afirma que devido a ligação mecânica, a superfície do agregado graúdo é em parte responsável pela ligação entre a matriz e os agregados, sendo que os agregados de rochas britadas, como as areias artificiais de calcário e gnaiss do presente trabalho, produz ligação superior comparada com cascalho. [NEV 1982] informa que este efeito depende da relação a/c e mais pronunciadamente nas baixas relações a/c . A textura superficial dos agregados tem grande influência na resistência à tração dos concretos porque a ligação matriz-agregado parece controlar a resistência à tração.

Interação química entre agregado e pasta apresenta também um papel interessante. [NEV 1982] informa sobre ligação química no caso de calcário, dolomita e agregados silicosos. [SWA], apud. [CET 1998] chamou a atenção para a reação química entre rochas carbonática e matriz de cimento, que pode resultar em fortes ligações.

Guinea et al [GUI 2002] estudaram o efeito da ligação entre a matriz e os agregados sobre o mecanismo de ruptura e parâmetros de fratura do concreto; onze misturas de concreto foram testadas com a mesma matriz e diferentes agregados (britados ou arredondados) e vários tratamentos superficiais foram aplicados para melhorar ou degradar a ligação entre a matriz e as partículas dos agregados.

c) Influência da Zona de Transição nas Propriedades do Concreto

A zona de transição, geralmente o elo mais fraco da corrente, é considerada a fase de resistência limite do concreto. É devido à presença da zona de transição que o concreto rompe a um nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência dos dois constituintes principais (pasta de cimento e agregado).

A resistência mecânica, a porosidade e a durabilidade, propriedades essenciais do concreto, são de suma importância na utilização do material. Sendo a resistência na região de contato inferior a resistência do agregado ou da pasta, faz com que a zona de transição se torne um limitador da resistência do concreto.

A zona de transição é um local com características mais fracas do concreto, com relação água/cimento mais elevada, menor coesão, na qual as fissuras se propagam com maior facilidade.

[VAL 1961], apud. [PAU 1991], discutiu como a aderência poderia afetar a durabilidade do concreto, e sugeriu que sua redução na incidência de fissuras na zona de transição diminuiria a permeabilidade e, como consequência aumentaria a durabilidade do concreto. Ele concluiu que a boa aderência é essencial para o concreto durável e solicitou a atenção dos pesquisadores no sentido de melhor estudarem a natureza e desenvolvimento dessa zona de ligação entre cimento e agregados.

[VAL 1961], apud. [PAU 1991], mediu a resistência à flexão e durabilidade em estudos utilizando a região de aderência entre a pasta de cimento com rochas de vários tipos e

com superfície lisas e fraturadas. Não foi observada uma clara dependência de resistência na superfície da rocha. Por outro lado, a durabilidade foi de igual a maior em superfície fraturada do que em superfície lisa. Esses resultados permitiram concluir que a natureza morfológica da ligação tem uma maior influência na durabilidade, enquanto que a natureza química tem maior influência na resistência da ligação.

3.1.4.3 Estrutura dos Agregados

Nos concretos convencionais, a seleção de agregados particularmente resistentes não é necessária. No concreto de alto desempenho [AÏT 2000], a pasta hidratada de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes, que os agregados podem tornar-se o elo mais fraco dentro do concreto.

A resistência do concreto é determinada pelas características da argamassa, agregado graúdo, e interface pasta-agregado. Para a mesma qualidade de argamassa, diferentes tipos de agregado graúdo com diferente forma, textura, mineralogia e resistência, pode resultar em concretos com diferentes resistências [WU 2001].

A resistência dos agregados naturais (areias e cascalhos, por exemplo) depende da natureza das rochas matrizes.

O processamento de agregados britados de rochas leva à obtenção de partículas com o mínimo possível de elementos fracos; a explosão e britagem de rochas resistentes, finamente texturada, propiciam a produção de partículas com quantidade mínima de microfissuras [AÏT 2000].

A fase agregado é predominantemente responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Estas propriedades do concreto dependem em larga extensão da densidade e resistência do agregado, que por sua vez são determinadas mais por características físicas do que por características químicas da estrutura do agregado. Em outras palavras, a composição química ou mineralógica das

fases sólidas do agregado é comumente menos importante do que as características físicas, tais como volume, tamanho e distribuição dos poros.

A granulometria é talvez a propriedade mais importante do agregado após a sua resistência. É ela que condiciona a compactidade do concreto e, portanto, todas as propriedades deste material [COU 1998].

É necessário determinar a resistência, textura e características mineralógicas, propriedades físicas e químicas da rocha e do agregado para a melhoria da resistência do concreto. A resistência de rochas é fortemente relacionada com sua composição mineralógica [YAS 2004].

Propriedades mecânicas e durabilidade do concreto contendo areia britada depende da composição da pasta, volume da pasta, características físicas das partículas da areia e natureza da interface pasta-agregado.

Vários estudos, [CAB 1997], [AIT 1990], [GIA 1992], [ZHO 1995], [ÖZT 1997], apud. [DON 2002], sobre concreto de alta resistência tem sido desenvolvidos com o objetivo de estudar a influencia do agregado graúdo de diferentes fontes mineralógicas. Entretanto, poucos estudos tem sido conduzidos sobre a influência de diferentes areias britadas [AIT 1998], e os códigos somente incluem breves referências sobre agregados miúdo [DON 2002].

[AIT 1990] apud. [CET 1998], mostraram que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de HPC ($a/c=0,275$) foram significativamente influenciados pela mineralogia do agregado graúdo.

Conforme [BAA 1991], apud. [CET 1998], concreto feito com quartzito apresentou maior módulo de elasticidade e menor resistência à compressão, porque a elevada dureza deste agregado causou concentração de tensão na interface. Porém, a mesma mistura, concreto feito com arenito com um relativo baixo módulo de elasticidade apresentou o mais baixo módulo de elasticidade, porém a maior resistência à

compressão.

[GIA 1992], apud. [CET 1998], informam resultados usando três tipos de agregados: basalto, granito e calcário, com as seguintes conclusões:

1. agregados mais duros não implicam necessariamente em maior resistência;
2. ligação agregado-matriz pasta de cimento é mais importante na flexão (resistência tração na flexão) do que na compressão;
3. a influência das características do agregado graúdo sobre a resistência à compressão cresce nos concretos de alto-desempenho (HPC).

3.2 CIMENTO PORTLAND

3.2.1 Definição

Os cimentos Portland são materiais finamente particulados e inorgânicos, que misturados com água originam misturas plásticas que, após um certo tempo, perdem plasticidade, solidificam-se e gradativamente adquirem resistência mecânica. São chamados ligantes hidráulicos porque, após endurecidos mantêm sua resistência e estabilidade sob água.

3.2.2 Histórico

Os materiais cimentícios são utilizados como materiais de construção há muitos séculos, desde a queima de gessos ímpuros e cimentos a base de cal. Os romanos produziam um material semelhante aos concretos atuais misturando cal extinta (cal virgem e água) areia e fragmentos de rocha.

A designação Cimento Portland advém, provavelmente da semelhança encontrada por Joseph Aspdin, industrial de Leeds, em 1824, entre o seu cimento endurecido e a "pedra de Portland", um calcário extraído em Dorset e bastante utilizado em construção na Inglaterra [NEV 1982].

3.2.3 Matérias-Primas

- Calcário: calcário (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) como impureza
- Argila: sílica (SiO_2) + alumina (Al_2O_3) + óxido de ferro (Fe_2O_3) +
+ álcalis ($\text{Na}_2 + \text{K}_2\text{O}$)
- Gesso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

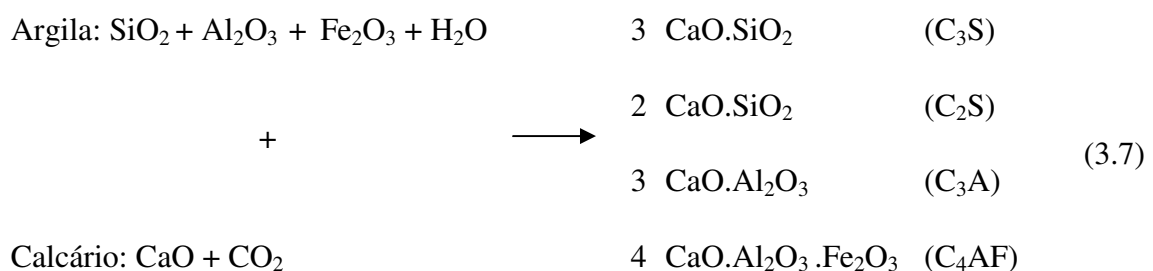
3.2.4 Fabricação

O processo de fabricação do Cimento Portland se inicia com a extração da matéria-prima e posterior mistura e moagem da mesma em moinhos de bolas, obtendo partículas menores que $75 \mu\text{m}$ [MEH 1994]. Essa mistura e moagem da matéria-prima é feita na maioria das vezes a seco, já que requer menor consumo energético, sendo denominada de "via seca":

- Via seca: a matéria-prima com baixo teor de umidade (0,2%) [NEV 1982] é moída em moinho de bolas gerando a chamada farinha crua, que é balanceada e vai para os silos de armazenamento. Além disso é pré-aquecida antes de entrar no forno.

O material é então submetido á queima e quando sai do forno (clínquer) é resfriado e levado até os silos de armazenamento, onde ficará até o processo de moagem.

Durante o processo de queima, as reações químicas que ocorrem no forno podem ser simplificadas como sendo as seguintes [MEH 1994]:



3.2.5 Composição Química do Cimento Portland

A obtenção da composição química do cimento é feita por meio de análise química, que expressa o percentual dos óxidos presentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2 , K_2O etc.). No entanto, não se pode tirar conclusões a respeito das fases presentes, nem correlacionar as propriedades dos cimentos com base na análise desses óxidos. Por isso, R. R. Bogue desenvolveu uma série de equações que, a partir do teor de óxidos (Tabela III.1), calculam os compostos finais presentes no clínquer (Tabela III.2) [MEH 1994].

Tabela III.1 Óxidos presentes no clínquer, abreviações e limites aproximados

Óxido	Abreviações	Teor (%)
CaO	C	60,0 - 67,0
SiO ₂	S	17,0 - 25,0
Al ₂ O ₃	A	3,8 - 8,0
Fe ₂ O ₃	F	0,5 - 6,0
MgO	M	0,1 - 4,0
SO ₃	S	1,0 - 3,0
K ₂ O	K	0,2 - 1,3
Na ₂ O	N	-

Fonte: MEHTA, MONTEIRO (1994); NEVILLE (1982)

Tabela III.2 Principais compostos do clínquer e abreviações

Composto	Abreviações
3 CaO.SiO ₂	C ₃ S
2 CaO.SiO ₂	C ₂ S
3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
4CaO.Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fonte: MEHTA, MONTEIRO (1994)

3.2.6 Características dos Compostos

As características dos cimentos dependem da sua composição química (características dos seus compostos), das adições (materiais pozolânicos, material carbonático) e do grau de moagem.

A Tabela III.3 mostra as principais características dos compostos dos cimentos, conforme [PET 1978].

Tabela III.3 Características compostos cimentos

Propriedade	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Resistência	boa	boa	fraca	Fraca
Intensidade de reação	média	lenta	rápida	Rápida
Calor desenvolvido	médio	pequeno	grande	Pequeno

3.2.7 Tipos de Cimento Portland

No Brasil vários tipos de cimento são produzidos, para aplicações diversas como premoldados, concretos de grande volume (concreto massa), concretos submetidos a meios agressivos etc.

A Tabela III.4 mostra os tipos de cimentos nacionais, com as correspondentes normas ABNT.

Tabela III.4 Tipos e constituição dos cimentos Portland normatizados no Brasil

Tipo	Sigla	Constituição				Norma ABNT
		Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Material carbonático	
Comum	CP I	100%	0%			NBR 7532
	CP I - S	95 - 99%	1 - 5%			
Composto	CP II - E	56 - 94%	6 - 34%	0%	0 - 10%	NBR 11578
	CP II - Z	76 - 94%	0%	6 - 14%	0 - 10%	
	CP II - F	90 - 94%	0%	0%	6 - 10%	
Alto-forno	CP III	25 - 65%	35 - 70%	0%	0 - 5%	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	45 - 85%	0%	15 - 50%	0 - 5%	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	95 - 100%	0%	0%	0 - 5%	NBR 5733
Resistentes aos sulfatos	RS	Idêntica a um dos cinco anteriores, do qual é derivado				NBR 5737
Destinado à cimentação poços petrolíferos	CPP classe G	100%	0%			NBR 9831

3.3 AGREGADOS

3.3.1 Definição

Entende-se por agregado, miúdo ou graúdo, o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia [PET 1978].

São agregados as rochas britadas, os fragmentos rolados, encontrados nos leitos dos rios e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rochas.

Os agregados usados nos concretos são divididos em dois grupos, miúdos (areias naturais ou artificiais) com diâmetros inferiores a 4,8 mm, e graúdos (rochas britadas, cascalhos de rio, etc.) com diâmetros superiores a 4,8 mm.

Agregados super-finos, os chamados “pó de pedra”, passando peneira n°200 (75 µm), são utilizados frequentemente em concretos de cimento Portland.

A acumulação de vasta quantidade de pó de pedra nas pedreiras ao redor das cidades é um grave risco para o meio ambiente.

Malhotra e Carette [MAL 1985] realizaram investigação para obter dados sobre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos incorporando porcentagens variadas de pó de calcário (limestone dust), com 96,2% passando na peneira n.º200, como substituto parcial para o agregado miúdo natural (0, 5, 10, 15 e 20%), em três séries de misturas de concreto ($a/c = 0,70 - 0,53 - 0,40$), fazendo os seguintes ensaios: resistência à compressão, tração na flexão, módulo elasticidade dinâmico e retração por secagem, sendo alguns desses ensaios com os corpos de prova submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento, para avaliação da durabilidade dos concretos.

R. Glencross – Grant^a *et al*, no ano de 2002, procederam a um levantamento de características de areias para construção na Austrália. Das 50 (cinquenta) areias coletadas, 17 (dezessete) foram extraídas de praias ou dunas, 3 (três) foram dragadas de estuários nas costas marítimas, 5 (cinco) tomadas do interior de enseadas, 18 (dezoito) foram de minas (rochas decompostas), 1 (uma) de rocha britada e 6 (seis) foram descritas como misturas de diversas fontes. [GLE 2003].

Os agregados são utilizados em lastros de ferrovias, base para calçamentos, concretos asfálticos, solos que constituem a pista de rolamento das estradas, e em concretos e argamassas de cimento Portland.

Ocupando aproximadamente 70% do volume dos concretos, a qualidade do agregado é importantíssima para a qualidade do concreto e também das argamassas.

Conforme [PET 1978], os agregados desempenham um importante papel nas argamassas e concretos, quer do ponto de vista econômico, quer do ponto de vista técnico, e exercem influência benéfica sobre algumas características importantes, como: retração, aumento da resistência ao desgaste, etc., sem prejudicar a resistência aos esforços mecânicos, pois os agregados de boa qualidade têm resistência superior à da pasta de cimento.

3.3.2 Tipos de Agregados

Várias são as rochas aptas a serem exploradas para a produção de agregados industrializados, como as pedras britadas e as areias artificiais britadas. As rochas mais exploradas, segundo [BAU 1994], são:

3.3.2.1 Granito

Rocha plutônica ácida (~75% de sílica), granular macroscópica; cristais de 1 mm a 5 mm, ou maiores, de cor cinza. Ordens de grandeza das constantes físicas:

- massa específica real (densidade) (kg/dm³) 2,7
- resistência à compressão (MPa) 90
- resistência à tração (flexão) (MPa) 30
- resistência à tração (compressão diametral) (MPa) 10
- módulo de elasticidade (E) (GPa) 34
- coeficiente de Poisson 0,28

3.3.2.2 Basalto

Rocha vulcânica básica (~50% de sílica) de cor cinza escura. Ordens de grandeza das constantes físicas:

- massa específica real (densidade) (kg/dm³) 2,9
- resistência à compressão (MPa) 140-180
- resistência à tração (flexão) (MPa) 30-80
- resistência à tração (compressão diametral) (MPa) 15
- módulo de elasticidade (E) (GPa) 34-80
- coeficiente de Poisson 0,28

3.3.2.3 Gnaisse

Rocha metamórfica, granular macroscópica. Ordens de grandeza das constantes físicas:

- massa específica real (densidade) (kg/dm^3) 2,8
- resistência à compressão (MPa) 90-110
- módulo de elasticidade (E) (GPa) 49-66
- coeficiente de Poisson 0,23

3.3.2.4 Calcário

Rocha sedimentar constituída de mais de 50% de carbonato de cálcio. Quando contém carbonato de cálcio e magnésio, são os dolomitos. Suas características físicas giram em torno de:

- massa específica real (densidade) (kg/dm^3) 2,8
- resistência à compressão (MPa) 160
- resistência à tração (flexão) (MPa) 20
- resistência à tração (compressão diametral) (MPa) 8
- módulo de elasticidade (E) (GPa) 74
- coeficiente de Poisson 0,23

I. H. ZARIF *et al* [ZAR 2003] pesquisando as propriedades de 20 (vinte) tipos de calcários calcítico, para uso em concreto de cimento Portland, em Istambul, Turquia, encontrou os seguintes resultados médios:

- massa específica real (densidade) – kg/dm^3 2,68
- absorção de água (%) 0,55
- resistência à compressão uniaxial (MPa) 103,65
- módulo de elasticidade (E) (GPa) 32,66

3.3.2.5 Arenito

Rocha sedimentar proveniente da consolidação de sedimentos arenosos; partículas de diâmetro entre 0,06 mm e 2 mm, os arenitos têm características físicas muito dispersas. Só os mais consistentes prestam-se ao preparo de agregados, quando então suas características físicas giram em torno de:

- massa específica real (densidade) – kg/dm³ 2,3 -2,7
- resistência à compressão (MPa) 50-180
- resistência à tração (flexão) (MPa) 19
- módulo de elasticidade (E) (GPa) 20
- coeficiente de Poisson 0,1

3.3.2.6 Escória de alto-forno

Resíduo da produção de ferro gusa em altos-fornos, composto de aglomeração de vários óxidos, principalmente de cálcio e silício. Suas características são da seguinte ordem de grandeza:

- massa específica real (densidade) – kg/dm³ 2,4
- absorção de água 2,5 %

Maslehuddin et al [MAS 2002] avaliaram as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos com agregados graúdo de escória de alto forno e calcário britado. Os agregados de calcário britado são fracos, altamente absorventes e são contaminados com cloretos e sulfatos. Os resultados indicaram durabilidade e propriedades físicas melhores dos concretos feitos com escória de alto forno.

3.3.2.7 Hematita

É óxido férrico, Fe₂O₃, que se constitui na mais abundante fonte de minério de ferro. Dureza Mohs 5 a 6; densidade 4,5 a 5,3. Usada em concretos pesados.

Segundo Aitcim e Mehta [AIT 1990], as características mineralógicas do agregado graúdo influenciam significativamente a resistência à compressão (f_c) e o módulo de

elasticidade estático (E) dos concretos de altíssima resistência à compressão (>80 MPa). Pesquisando o comportamento de quatro tipos de agregados graúdos (britas de diabásio, calcário e granito; e cascalho de rio), com granulometrias idênticas e em concretos com traços similares, obtiveram os seguintes resultados mostrados na Tabela III.5.

Tabela III.5 – Resistência compressão e módulo de elasticidade de concretos, com traços similares e agregados graúdos diferentes

Idade (dias)	Diabásio		Calcário		Cascalho		Granito	
	fc (MPa)	E (GPa)	fc (MPa)	E (GPa)	fc (MPa)	E (GPa)	fc (MPa)	E (GPa)
1	41,1	-	42,5	-	40,6	-	37,2	-
28	100,7	36,6	97,3	37,9	92,1	33,8	84,8	31,7
56	104,8	37,9	101,3	40,7	95,9	35,9	88,6	33,8

Aykut Cetin et al [CET 1998] estudaram o efeito de quatro tipos de agregados graúdos (cascalho de rio britado, basalto, calcário calcítico britado e calcário dolomítico britado) sobre as propriedades mecânicas (resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e resistência à tração na flexão) de concretos de alto desempenho HPC ($a/c=0,28$; consumo de cimento= 597 kg/m^3). Cada tipo de agregado foi usado variando a sua quantidade, em volume, por m^3 de concreto (36%, 40% e 44%).

Algumas das conclusões do trabalho estão relacionadas a seguir:

- as características mineralógicas do agregado graúdo parece ser um importante fator influenciante nas propriedades mecânicas do concreto. O baixo módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão dos concretos com calcário calcítico parece ser devido à grande quantidade de calcita, um mineral macio e abundante na composição do calcário calcítico;
- concretos com cascalho britado apresentaram baixa resistência à compressão, pela falta de aderência mecânica (pasta x agregado), à forma e textura superficial do agregado;

- aumentando o conteúdo do agregado graúdo parece resultar numa redução da resistência à tração na flexão para um dado tamanho de agregado;
- o módulo de elasticidade parece independender do tamanho do agregado para um dado conteúdo de agregado.

3.3.3 Características dos Agregados e sua Importância

3.3.3.1 Massa Específica

Os agregados naturais são porosos, variando de 2% (rochas ígneas), 5% (rochas sedimentares densas), e de 10% a 40% para arenitos e calcários muito porosos.

A massa específica aparente (massa de material por unidade de volume) varia de 2600 kg/m³ a 2700 kg/m³ e a unitária (massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume) varia de 1300 kg/m³ a 1750 kg/m³ [MEH 1994].

3.3.3.2 Absorção e Umidade Superficial

Quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não há um filme de água na superfície, o agregado é dito estar na condição saturada superfície seca (SSS); quando o agregado está saturado e também há umidade livre na superfície, o agregado está na condição úmida saturada. Na condição seca em estufa toda a água evaporável do agregado foi removida pelo aquecimento a 100°C. A capacidade de absorção é definida como a quantidade total de água requerida para trazer um agregado da condição seca em estufa para a condição SSS; a absorção efetiva é definida como a quantidade de água requerida para trazer o agregado da condição seca ao ar para SSS.

Areias podem sofrer um fenômeno conhecido como inchamento. Dependendo do teor de umidade e composição granulométrica do agregado, pode ocorrer um aumento considerável do volume aparente da areia, porque a tensão superficial da água mantém

as partículas afastadas. Como a maioria das areias são despachadas para uso na condição saturada, podem ocorrer grandes variações nos consumos por betonada, se a dosagem for feita em volume. Por esta razão, a dosagem em massa tem se tornado uma prática normalizada na maioria dos países.

3.3.3.3 Resistência à Compressão, Resistência à Abrasão e Módulo de Elasticidade

São propriedades inter-relacionadas e que são muito influenciadas pela porosidade. Os agregados naturais, comumente usados para a produção de concreto normal, são geralmente densos e resistentes; portanto raramente é um fator limitante da resistência e propriedades elásticas do concreto endurecido. Valores típicos da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dinâmico da maioria dos granitos, basaltos, “trapps”, “flints”, arenito quartzítico e calcários densos variam de 210 MPa a 310 MPa e 70 GPa a 90 GPa, respectivamente. Quanto a rochas sedimentares, a porosidade varia numa faixa mais larga, e da mesma forma a sua resistência máxima à compressão, para cada tipo de rocha, foi da ordem de 240 MPa. Alguns calcários e arenitos apresentam resistências à compressão tão baixas quanto 96 MPa e 48 MPa, respectivamente [MEH 1994].

3.3.3.4 Sanidade

Considera-se que o agregado é instável quando mudanças no seu volume, induzidos pelo intemperismo, como ciclos alternados de umedecimentos e secagem, ou congelamento e descongelamento, resultam na deterioração de concretos e argamassas. Geralmente a instabilidade ocorre para todas as rochas que têm uma certa estrutura porosa [MEH 1994].

3.3.3.5 Composição Granulométrica

Composição granulométrica é a distribuição das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões, e é usualmente expressa em termos de porcentagem acumuladas

maiores ou menores do que cada uma das aberturas de uma série de peneiras, ou de porcentagens entre certos intervalos de abertura das peneiras.

A origem dos depósitos de cascalhos e rochas causa grandes diferenças na forma e granulometria dos agregados e estas diferenças são mais pronunciadas no material fino. Partículas finas são em geral muito mais alongadas/ou irregulares do que as partículas graúdas [PER 1998].

É muito importante a especificação de limites granulométricos e da dimensão máxima dos agregados, devido à sua influência na trabalhabilidade e custo dos concretos. Por exemplo, areias muito grossas produzem misturas de concreto muito ásperas e não trabalháveis; areias muito finas aumentam o consumo de água e as areias médias (que não têm uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula) produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

O início dos estudos de granulometria se deu com Feret, na França, devendo-se, porém, a Fuller e a Thompson, nos Estados Unidos, as primeiras investigações em grande escala [PET 1978].

Quanto à curva granulométrica ideal dos agregados para os concretos, a orientação de J. Bolomey (de Lausanne), através de suas curvas granulométricas, ainda hoje é preconizada e utilizada em muitos lugares [PET 1978].

A trabalhabilidade, a densidade, a segregação e as características de acabamento de um concreto são grandemente influenciadas pela granulometria dos agregados [SCA 1986].

3.3.3.6 Forma e Textura das Partículas

A forma das partículas influi muito sobre as propriedades do concreto tais como trabalhabilidade, ângulo de atrito interno, compacidade e, em última análise, sobre todas as que dependem da quantidade da água de amassamento [COU 1988].

Para determinar a forma das partículas podem seguir-se dois processos: fazer medições geométricas sobre cada uma das partículas, ou determinar certas propriedades do seu conjunto como a permeabilidade, a massa unitária e o tempo de escoamento de um dado volume de agregado através de um orifício [COU 1988].

O primeiro processo é laborioso e pouco cômodo, especialmente quando se pretende fazer ensaios de rotina, mas é o processo mais preciso para a definição da forma.

a) Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro:

É um método da ABNT – NBR 7809, para agregado graúdo, sendo que o índice de forma dos grãos do agregado não deve ser superior a 3.

b) Determinação do coeficiente volumétrico:

O processo mais apropriado para medir a forma é baseada na esfericidade ou coeficiente volumétrico, γ , quociente do volume da partícula, V , pelo volume da esfera de diâmetro igual à maior dimensão, N , da partícula [DUR 1961], apud. [COU 1988].

O coeficiente volumétrico é definido para o agregado graúdo, e não para a areia, dada a dificuldade da sua determinação neste caso [COU 1988].

c) Determinação da forma a partir da medição do coeficiente de permeabilidade:

A forma das partículas também se pode avaliar a partir da medição do coeficiente de permeabilidade [LOU 1952], apud. [COU 1988] de uma camada de partículas de dimensões uniformes, obtidas pela separação entre duas peneiras cuja abertura seja d e $2d$, por exemplo. Chama-se então angularidade à relação entre a superfície específica da fração do agregado calculada através do coeficiente de permeabilidade de uma camada do material com determinada porosidade e a superfície específica de esferas uniformes com igual dimensão granulométrica.

d) Determinação da forma a partir da medição da massa unitária e do volume de vazios:

Tendo em vista que o grau de compactidade ou de arrumação das partículas de dimensão uniforme depende da sua forma, um outro processo de ter em conta a forma consiste na apreciação do volume de vazios obtidos pela arrumação do agregado de dimensão uniforme (monogranular) [COU 1988].

Supondo o caso limite de esferas de igual diâmetro agrupadas de modo que tenham o máximo de compactidade, ou seja, de forma que cada esfera seja tangente a 12 outras esferas (arranjadas de maneira que o centro de cada uma ocupa o vértice de um tetraedro) a relação entre o volume real e o volume aparente, isto é, a compactidade ou percentagem do volume sólido seria $(\pi \cdot 2^{1/2}) \div 6 = 0,74$. Se os centros das esferas ocuparem os vértices de cubos, a compactidade será de 0,52 [ANS 1941], apud. [COU 1988].

Como na prática não existe qualquer destes arranjos, a norma BS 812, toma para percentagem do volume do sólido do material mais arredondado que já foi possível encontrar o valor 0,67, a que corresponde o índice de vazios de 0,33; medindo a percentagem de volume sólido de um dado agregado monogranular compactado de determinada maneira, e subtraindo-o de 0,67, o número obtido mede a percentagem de vazios em excesso sobre o material bem arredondado. Quanto maior é o número mais anguloso é o agregado. Em geral este número está compreendido entre 0 e 0,12 [COU 1988].

e) Determinação da forma a partir da medição de tempos de escoamento do agregado:

Este método é aplicável à areia, e consiste, no fundo, num aperfeiçoamento e extensão do método anterior. Um dado volume de areia rigorosamente seca cai através de um orifício sobre uma medida de volume conhecido. A medição do tempo de escoamento de um volume conhecido de areia, e a medição da massa unitária obtida pela sua queda permite tirar conclusões sobre a forma das partículas [KIN 1972] [TOB 1978], apud. [COU 1988].

Algumas partículas típicas do agregado são mostradas na Figura 3.2. Geralmente, o seixo natural tem uma forma arredondada e uma superfície de textura lisa. Rochas britadas têm uma textura rugosa; dependendo do tipo de rocha e da escolha do britador, o agregado britado pode conter uma proporção considerável de partículas chatas ou alongadas, que afetam negativamente muitas propriedades do concreto. Partículas de agregado leve de pedra-pomes que é altamente celular, são também angulares e de textura rugosa, mas as de argila ou folhelho expandidos são geralmente arredondadas e lisas.

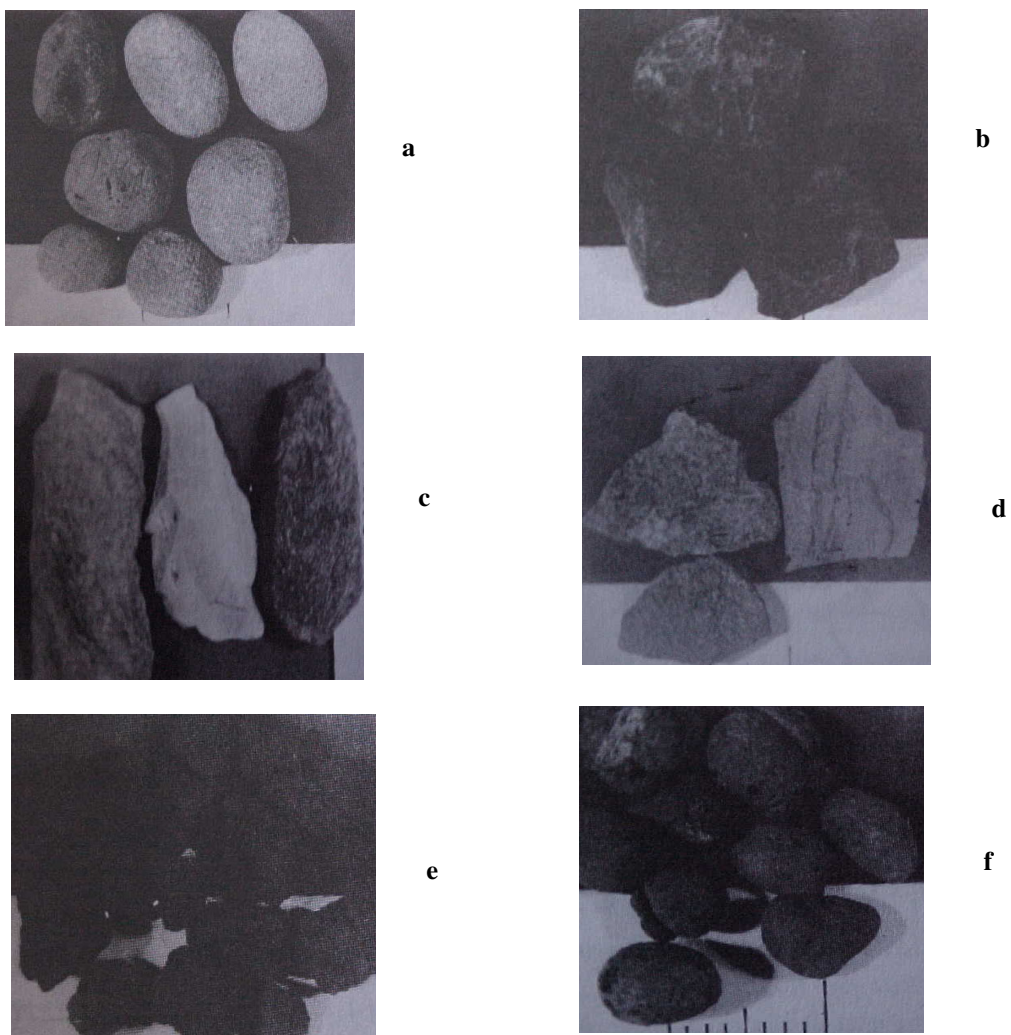


Figura 3.2 Forma e textura da superfície de partículas de agregado graúdo: (a) seixo arredondado e liso rolado; (b) rocha britada, equidimensional; (c) rocha britada, alongada; (d) rocha britada chata; (e) agregado leve, anguloso e rugoso; (f) agregado leve, arredondado e liso - Fonte: [MEH 1994]

Embora os agregados para concretos, de diferentes origens, possam ter graduações semelhantes, muitas vezes comportam-se de maneira bastante diversa, devido à forma e textura das partículas.

Tanto a forma como a textura afetam a mobilidade do agregado, ou seja, a facilidade com que as partículas movem-se umas sobre as outras quando manipuladas.

A aderência do agregado com a pasta de cimento é um fator importante da resistência do concreto, em especial, da resistência à tração [SCA 1986].

O rompimento do concreto através das partículas é um indicativo de boa aderência quando o agregado for de boa qualidade [SCA 1986].

As propriedades dos agregados, como tamanho, graduação, forma e textura da superfície, têm marcante influência sobre a trabalhabilidade e resistência do concreto. Agregados mais angulosos e ásperos contêm mais vazios do que agregados arredondados e lisos, demandando mais água para produzir concretos com trabalhabilidade. A ligação mecânica entre a superfície do agregado e a pasta de cimento, influencia a resistência do concreto [JAM 2004].

3.3.3.7 Composição Química e Mineralógica

Do ponto de vista mineralógico, a natureza dos agregados pode ser tal que promova a aderência cristalina da pasta aos agregados, sendo esta uma área ainda carente de pesquisa, embora já existam tentativas de elevação de resistência dos concretos com o emprego de agregados especiais como clínquer de cimento Portland ou aluminoso, escórias de alto forno etc. [SAU 1980] [HAR 1969] [NEV 1982] [FRE 1971] [KIH 1984] [PAR 1969] [MON 1986], apud. [ALM 1990].

No caso específico dos agregados miúdos, tanto as areias naturais quanto as artificiais provenientes de rochas britadas podem ser empregadas com o mesmo objetivo [LAR

1987] [PAR 1969] [BUR 1989] [RAN 1989] [ASS 1989] [AIT 1990] [SAR 1987] [CHA 1971], apud. [ALM 1990].

Existem entretanto referências da substituição da fração mais fina ($<0,4$ mm) da areia natural por materiais calcários moídos, com elevações de 40% da resistência à compressão e de 15% da resistência à flexão de concretos correntes [COU 1973] [CUS 1972] [BUC 1966] [SBR 1975], apud. [ALM 1990].

Neste tipo de agregado parece haver uma reação entre os componentes hidratados do cimento (nomeadamente os alcalinos) e a superfície do agregado, que promove uma certa “corrosão”, ou dissolução de parte dessa superfície, seguida por outras reações que promovem uma ligação epitaxial que atravessa a interface agregado-pasta, aprimorando a aderência. Verificou-se também que quanto mais fino o agregado, e portanto, maior a sua superfície específica exposta à reação, maior a aderência entre as duas fases [BUC 1966], apud. [ALM 1990].

Bedard e Aitcin [BED 1983], apud. [ALM 1990] recomendam também a compatibilidade dos agregados graúdos e miúdos, tendo obtido resistências à compressão máximas em concretos onde a natureza mineralógica dos dois tipos de agregado era igual, sendo ambos britados. Atribuíram este fato, para além da maior aderência agregado – pasta, à maior homogeneidade do concreto, provocada pelas iguais características mecânicas dos agregados, observações estas semelhantes às realizadas por outros autores, com relação ao módulo de elasticidade dos concretos de alta resistência [CAR 1981], apud. [ALM 1990].

3.3.3.8 Reação Álcali-Agregado

Expansão e fissuração, levando à perda de resistência, elasticidade e durabilidade do concreto, também podem resultar de reações químicas entre os íons alcalinos do cimento (ou de outras fontes), os íons hidroxila e determinados componentes dos agregados.

Este fenômeno tem sido motivo de investigações, buscando entender o mecanismo de reação e os fatores que o influenciam, bem como soluções seguras e viáveis para a recuperação de estruturas que apresentam os seus sintomas.

Conforme várias publicações, [BIC 1972], [MEH 1986], [TUT 1982], apud. [FUR 1997], Stanton, em 1940, deduziu que a reação entre determinados componentes do agregado e os hidróxidos alcalinos do cimento, liberados na hidratação, era a causa primária de fissuras e expansões em algumas estruturas de concreto na Califórnia.

Conforme [FUR 1997], a reação álcali-agregado ocorre entre os álcalis liberados na hidratação do cimento e alguns tipos de minerais presentes no agregado. Baseada na composição mineralógica reativa desses agregados, esta reação classifica-se em:

- Reação Álcali-Sílica;
- Reação Álcali-Silicato;
- Reação Álcali-Carbonato.

A reação do tipo álcali-sílica é entendida como a reação química que envolve íons alcalinos e hidroxilas, originários na hidratação do cimento e o agregado, cuja fase mineralógica contém sílica na forma amorfa, tais como opala, calcedônia, cristobalita e tridimita, certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais.

A reação álcali-silicato, segundo Yushiro Kihara [KIH 1986], apud. [FUR 1997], ocorre entre os álcalis do cimento e os silicatos existentes nos feldspatos, folhelhos argilosos e certas rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, quartzitos, xistos) e magmáticas (granitos).

A reação álcali-carbonato ocorre entre os álcalis do cimento e o calcário dolomítico, havendo formação de brucita $Mg(OH)_2$, regeneração de hidróxidos alcalinos e não ocorrendo formação de gel expansivo como na reação álcali-sílica.

A expansão devida à reação álcali-agregado pode ser reduzida ou eliminada com adição, ao concreto, de materiais pozolânicos (pozolana natural, cinza volante – fly ash, escória de alto forno, sílica ativa ou microssílica e cinza de casca de arroz) finamente moídos em quantidade suficiente, determinadas em ensaios. Quantidades inadequadas podem, na realidade, agravar a situação e aumentar a expansão se for obtida uma relação sílica/álcali particularmente adversa.

A redução de expansão pode ser obtida, também, com emprego de agregado pulverizado (arenito, quartzito, areia natural, cascalho natural, siltito etc.).

O uso de agregado pulverizado tem sido uma alternativa para suprir a falta de material cimentício natural (material pozolânico), como ocorreu na Barragem de Capanda, em Angola; esta tecnologia ainda pouco disseminada, foi apresentada pelo engenheiro Albert Osipov.

Osipov [ALM 1991], apud. [FUR1997] fundamenta-se na hipótese de que os finos das areias britadas se tornariam aglomerantes, por causa da energia eletrostática liberada pela quebra das moléculas na britagem. Esta característica tende a se estabilizar com o tempo, devido à aproximação das moléculas novamente, por ocasião do adensamento.

Outros fatores que influenciam a expansão álcali-agregado são: teor de álcalis no concreto, tipo e tamanho dos agregados reativos, proporção cimento-agregado, umidade e temperatura.

H. Marzouk *et al* [MAR 2003], em trabalho referente ao efeito da reação álcali-agregado sobre as propriedades mecânicas de concretos de alta e normal resistência, recomenda a análise petrográfica como um processo inicial para detectar o potencial reativo do agregado. Se os agregados contêm minerais específicos, conhecidos por sua reatividade, o agregado pode ser rejeitado.

3.3.4 Resíduos

Pesquisas estão sendo feitas para misturar grandes quantidades de pó mineral no concreto como uma alternativa para o cimento Portland, pela redução do impacto ambiental, preservação de fontes e melhoramento de desempenho. O desenvolvimento de concretos com grande volume de cinzas volantes, HVFC (high volume fly ash), por [SIV 1989], apud. [UCH 1996] é um exemplo do desenvolvimento. Grandes quantidades de pós minerais reativos incluindo pó de quartzo tem recentemente sido usado com a obtenção dos concretos com pós reativos, RPC (reactive powder concrete), um material de altíssima resistência [UCH 1996].

Uchikawa et al [UCH 1996] estudaram a influência nas propriedades do concreto, da substituição parcial do agregado miúdo por grande quantidade de pó mineral (cinzas volantes - fly ash, escórias de alto forno, pedra de calcário e pedra silicosa).

Outros materiais, considerados resíduos antes da realização de estudos para avaliação dos seus desempenhos, são utilizados no concreto de cimento Portland, com as seguintes denominações:

- Adições minerais
- Finos de pedras britadas
- Entulho de construção civil

3.3.4.1 Adições Minerais (conforme item 3.4.)

3.3.4.2 Finos de Pedras Britadas

Os finos gerados pela produção de pedras britadas podem ser considerados, ainda hoje, como materiais marginais ou resíduos de mineração quando não possuem valor comercial de mercado. Este material é proveniente dos processos de britagem de rochas estáveis, conforme tratado no item 3.2.2 deste trabalho.

A indústria da Construção Civil consome parte desse resíduo nos seguintes setores:

- Fabricação de peças premoldadas: blocos de concreto para alvenaria etc.
- Camadas de base e sub-base, nas pavimentações

- Como agregado miúdo para argamassas e concretos: o material é conhecido como areia de brita ou areia artificial

M. Galetakes et al [GAL 2004] procederam experiências para desenvolver um novo produto para as construções consistindo principalmente de pó de calcário, o qual é considerado um resíduo ou sub-produto de pedreiras, e uma pequena quantidade de cimento Portland (traços em massa 1:10, 1:12,5 e 1:15) e água; os corpos de prova cilíndricos, compactados sob alta pressão, apresentaram resultados de resistência à compressão superiores a 7 MPa, dependendo do traço e da energia de compactação. Resultados mostraram que o pó de calcário pode ser usado na produção de tijolos pré-moldados para alvenaria com propriedades mecânicas aceitáveis.

Quando não possuem destinação definida, são estocados ao ar livre nos pátios das pedreiras, formando enormes pilhas expostas à ação de intempéries, gerando impactos ambientais, tais como: poluição atmosférica, assoreamento de rios e leitos d'água, além de contaminação pelo material lixiviado nas áreas de drenagem [LIG 2001].

3.3.4.3 Entulho de Construção Civil

Entulho de construção civil são sobras e rejeitos constituídos por todo material mineral oriundo do desperdício inerente ao processo construtivo adotado na obra nova ou de reformas e demolições [LEV1997].

A Tabela III.6 fornece a composição média do entulho coletado no município de São Carlos – SP, em 1985, [PIN 1989], apud. [LEV 1997].

Tabela III.6 Composição média do entulho de São Carlos em 1985

Material	Composição %
Argamassa	64
Tijolo Maciço	18
Telha	11
Concreto	4
Pedra	1
Outros	2

Atualmente, com mudanças nos processos construtivos (revestimento de gesso, alvenarias com placas de gesso – dry wall etc.), a composição média do entulho seria bem distinta.

Os resíduos de entulho de construção civil têm as seguintes aplicações:

a) “in natura”, sem nenhum tratamento ou seleção prévia, o entulho é simplesmente depositado em bota-foras ou aterros;

b) após seleção prévia, britagem ou moagem, e peneiramento:

- como agregado miúdo, em: argamassas de assentamento; revestimento interno e externo e enchimento de pisos;
- como agregado graúdo, em: blocos vazados de concreto para vedação; estabilização de sub-bases, preparo de bases e concretos para pavimentos;
- filler (finos da britagem), em concreto asfáltico, na URSS, em 1985, [ZAG 1985], apud. [LEV 1997].

A demolição de velhas construções é o principal passo para a reconstrução das mais importantes cidades do mundo. Aproximadamente 50 milhões de toneladas de resíduos de demolição são produzidos na Comunidade Européia, 11 milhões no Reino Unido, 12 milhões no Japão e 60 milhões na Rússia, podendo triplicar futuramente. A maior porção deste resíduo de demolição é entulho de alvenaria consistindo de tijolos de argila

[HAN 1992], apud. [ZAK 1996].

Agregados de concreto reciclado, algumas vezes referido como concreto britado, procede da demolição de elementos de concreto de cimento Portland de construções, rodovias e outras infraestruturas. Devido à reserva de fontes naturais, prevenção da poluição ambiental e economia de custo das obras, os agregados de concreto reciclado têm sido amplamente utilizados na fabricação de diferentes materiais de construção [POO 2002], apud. [LIN 2004], produzindo concreto de alta resistência e desempenho [AJD 2002], apud. [LIN 2004] ou servindo como base ou sub-base na construção de rodovias [BEN 2000], apud. [LIN 2004].

Amnon Katz [KAT 2003] estudou as propriedades do concreto feito com agregado reciclado de concreto velho, parcialmente hidratado, britado nas idades de 1, 3 e 28 dias. Na substituição do pavimento de concreto de uma rodovia, uma fonte uniforme de agregado reciclado é garantida (da demolição do pavimento velho) [TAV 1996], apud. [KAT 2003].

3.3.4.4 Gestão de Resíduos

A simples, porém dispendiosa, prática de remover entulho está sofrendo mudanças significativas. Daqui a pouco tempo não será mais suficiente apenas contratar os serviços de caçambeiros e esquecer da existência dos resíduos. As construtoras serão obrigadas a apresentar, junto com o projeto de liberação da obra, um outro de remoção e destinação compromissada do entulho.

A discussão que abarca as questões de destinação, reuso e reciclagem foi iniciada a partir da elaboração da resolução 307, do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). O grupo responsável pelo texto era formado por professores, construtores e caçambeiros e vinha se reunindo desde 1999 até que, em julho de 2002, apresentou as novas regras para os Resíduos de Demolição e Construção.

O ponto mais polêmico da resolução é a transferência da responsabilidade pelo entulho. Se até então a sociedade paga pela deposição irresponsável do material, que é um subproduto da construção, a partir da data-limite de 2 de janeiro de 2005, os construtores e demolidores serão responsabilizados pelo lixo “construtivo”. Apenas na cidade de São Paulo são geradas, diariamente, cerca de 17 mil t de entulho proveniente da construção civil. O lixo comum domiciliar responde por cerca de outras 8 mil t [TEC2004].

No entanto, é necessário promover uma maior divulgação e treinamentos específicos para que a proposta da resolução seja bem-sucedida. Caso contrário, os Projetos de Gerenciamento de Resíduos, a serem desenvolvidos em cada construtora, tenderiam a não atender os requisitos do CONAMA. Prevendo tais dificuldades, o SindusCon – SP, em conjunto com a SSO (Secretaria de Serviços e Obras) do município de São Paulo, com a empresa Obra Limpa, o Sieresp (Sindicato das Empresas Removedoras de Entulho do Estado de São Paulo) e mais uma série de assessores, desenvolveu o Programa Piloto de Gestão de Resíduos em Canteiro de Obra – o Obra Limpa.

A resolução 307 em si não define os parâmetros de operação para os municípios ou construtoras, mas estabelece regras para que cada agente envolvido no processo de geração de resíduos não agride o ambiente. Por isso, prioriza a não-geração de resíduos.

Para tanto, define todos os termos envolvidos: resíduos da construção civil, geradores, transportadores, agregado reciclado, gerenciamento de resíduos, reutilização, reciclagem, beneficiamento, aterro de resíduos da construção civil e áreas de destinação de resíduos. Em seguida, restringe-se aos resíduos para dividi-los entre as classes A (reutilizáveis), B (recicláveis), C (reciclagem inviável) ou D (resíduos perigosos).

Em relação às obrigações das partes envolvidas, a resolução coloca grandes geradores – entre os quais as construtoras – em um grupo e pequenos geradores – população em geral – em outro. Ambos fazem parte do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil. No entanto, os grandes geradores devem desenvolver Projetos de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, enquanto os pequenos geradores,

responsáveis por 75% do entulho gerado, terão que atuar de acordo com os Programas Municipais de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil.

A empresa Obra Limpa enumera uma série de resultados conquistados com a implantação de um eficiente sistema de gestão de resíduos. Dentre os pontos, destaca-se a isenção de responsabilidade por passivos ambientais, o atendimento a requisitos ambientais dos programas de certificação (PBPQ-H, QualiHab, ISO 14000), a redução de volume de resíduos, do consumo de materiais como areia e pedra, o diferencial de imagem no mercado, a possibilidade de agregar argumento de venda e atingir novos grupos de consumidores, a diminuição de acidentes de trabalho, entre outros [TEC 2004].

3.3.5 Areias Artificiais

3.3.5.1 Introdução

Na produção de agregado graúdo britado, pelo britamento de rochas estáveis, obtém-se quantidades apreciáveis de agregado miúdo, transformado muitas vezes em depósitos de resíduos, prejudiciais ao meio ambiente, pelo desconhecimento do meio técnico, causado geralmente por falta de pesquisas, das vantagens da sua utilização em argamassas e concretos de cimento Portland.

No mercado da construção civil, o mesmo material pode ser definido por termos técnicos distintos, como os agregados miúdos originários de britamento de rochas, com as seguintes denominações:

- areia artificial;
- areia de brita;
- areia britada;
- pó de pedra;
- finos de pedras britadas ou finos de britagem.

Para Cushierato [CUC 2000], apud. [LIG 2001], areia de brita (areia artificial ou areia britada) é o material resultante de britagem de rochas em pedreiras, onde o

beneficiamento final é feito a úmido com a lavagem nas etapas finais de classificação para a retirada da fração mais fina (inferior a 0,074 mm), cuja granulometria final situa-se entre 4,8 mm e 0,074 mm.

[LIG 2001] define, também, finos de pedras britadas ou finos de britagem (ou pó de pedra) como o agregado com granulometria inferior a 4,8 mm e sem descarte de fração inferior a 0,074 mm.

A Tabela III.7 mostra algumas denominações desses tipos de agregados miúdos e as referências bibliográficas e a Tabela III.8 mostra as granulometrias de alguns desses agregados.

Tabela III.7 Denominações de agregados miúdos originários do britamento de rochas

Referência	Denominação
[TER 2002], [LIG 2001], [ALM 2002]	Finos de pedras britadas
[KIM 1997], [DON 2002], [FUR 1997], [SBR 1975], [AHM 1989], [BAU 1998]	Areia britada (crushed sand)
[MAL 1987], [UCH 1996], [POS 2003], [CEL 1996], [FER 2002], [QUE 2002], [BOM 1994], [GAL 2004]	Pó de pedra (stone dust, mineral powder)
[CUC 2000], apud. [LIG 2001]	Areia de brita
[FRA1996], [SAL 1998], [BAS 2003], [BAU 1998], [TIE 2003]	Areia artificial
[BET 2002]	Areia especial

Tabela III.8 Composições granulométricas de finos de pedras, areia britada (LS:limestone sand) e areia artificial, com as seguintes notações: retida (Ret.), retida acumulada (Ret. Ac.) e módulo de finura (MF)

Material	Finos de pedras		Areia Britada (LS)		Pó Pedra		Areia Artificial	
Referência	[LIG 2001]		[DON 2002]		[FER 2002]		[BAS 2003]	
Peneiras	(%)		(%)		(%)		(%)	
(mm)	Ret.	Ret.Ac	Ret.	Ret.Ac	Ret.	Ret.Ac	Ret.	Ret.Ac
9,5			1,0	1,0	0,2	0,2		
6,3			0,0	1,0	1,5	1,7	0,0	0,0
4,8	4,0	4,0	5,0	6,0	1,6	3,3	1,0	1,0
2,4	23,2	27,2	32,0	38,0	6,2	9,5	10,0	11,0
1,2	21,4	48,6	23,0	61,0	15,9	25,4	36,0	47,0
0,6	16,0	64,6	14,0	75,0	17,4	42,8	27,0	74,0
0,3	13,4	78,0	6,0	81,0	23,0	65,8	14,0	88,0
0,15	8,8	86,8	5,0	86,0	19,6	85,3	8,0	96,0
0,074	6,0	92,8	3,4	89,4	-	-	0,5	96,5
Fundo	7,2	100,0	10,6	100,0	14,7	100,0	3,5	100,0
MF		3,09		3,48		2,32		3,17
D _{máx} (mm)		4,8		6,3		4,8		4,8

3.3.5.2 Características

O uso de areia britada como agregado miúdo tem aumentado rapidamente devido a diminuição da areia de rio, fazendo com que muitas construções utilizem areia do mar e areia britada. Areia britada é diferente em forma, graduação e teor de finos (<75 µm) se comparada com a areia de rio, e é bem conhecido que as propriedades do concreto com este tipo de areia são diferentes do concreto com areia de rio [KIM 1997].

A areia artificial britada possui forma mais angulosa dos grãos. A textura superficial mais áspera e a maior porcentagem de finos, abaixo da peneira nº200 (75 µm), dificulta um pouco a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, o que pode ser corrigido com adição de aditivos químicos plastificantes, e que incorporam pequena porcentagem de ar, ou a adição, inferior a 50%, de areia quartzosa natural de grãos arredondados.

A textura áspera dos grãos da areia artificial britada facilita a ligação mecânica, por rugosidade superficial, entre a pasta de cimento e o agregado, o que aumenta a resistência mecânica (tração, compressão, etc.) do concreto de cimento Portland.

Segundo Tahir Celik *et al* [CEL 1996], agregados de rochas britadas são mais adequados para a produção de concreto de alta resistência comparado à areia e cascalho natural. Agregados de rocha britada diferem da areia e do cascalho na forma da partícula, textura superficial e na graduação de finos: “pó rochas britadas” ou simplesmente “pó”, isto é, partículas passando na peneira 75 µm (nº200 – ABNT). British Standard, BS882: Part2, 1983 permite um conteúdo máximo de 15% em massa, de “pó”, para os agregados finos de rochas britadas e 10%, em massa, para o agregado total (miúdo+gráúdo). Se existe uma relutância no uso de agregados de rocha britada em concreto, ela é baseada no maior teor de “pó” presente nos finos de rochas britadas do que na areia natural.

Maior conteúdo de “pó” no agregado aumenta a finura e a área total da superfície das partículas do agregado, requerendo mais água de amassamento para a manutenção da trabalhabilidade, afetando a qualidade do concreto.

Pó de rocha britada atua como um filler e ajuda reduzir o conteúdo total de vazios no concreto. Conseqüentemente, isto contribui para aumentar a qualidade do concreto [CEL 1996].

Argilas e siltes estão comumente presentes em areia natural e pó de pedra está presente em areia britada. Em concreto fresco, a trabalhabilidade, conteúdo de ar e exsudação são reduzidos dependendo da quantidade e composição dos materiais finos, do conteúdo de

cimento e da graduação da areia [POP 1979] [KAL 1977] [AHM 1989], apud. [BON 1994]. No estado endurecido, a presença de materiais finos pode ser benéfica para concreto de baixa resistência, porém pode ter efeito adverso na retração [AHM 1989], apud. [BON 1994] e sua durabilidade é prejudicada [POP 1979], apud. [BON 1994]. A ASTM limita o teor de pó em 2% máximo. Contudo, BS882 aceita até 15% de pó [BON 1994].

Bev Brown [BRO 1998], em artigo sobre agregados para concreto, afirma que concretos com resistência mais baixa (<40 MPa), texturas de agregados mais lisas e arredondadas requerem menos água para atingir uma dada trabalhabilidade. Contudo, nas resistências mais altas, concretos com agregados mais lisos podem romper na ligação pasta-agregado. Isto pode ser parcialmente superado pela britagem para produzir maior interação. A textura superficial tem também um importante efeito sobre a resistência à flexão (flexural strength) a qual tende a reduzir com a maior lisura do agregado.

Pesquisas realizadas com areias de Riad, na Arábia Saudita, revelam a presença de considerável quantidade de material fino, passando na peneira nº200 (75 µm) nas areias, em forma de silte, argila e pó de calcário, com influência nas propriedades do concreto fresco e endurecido.

Camadas de argila sobre a superfície do agregado interfere na ligação entre a pasta de cimento e o agregado, com prejuízos na resistência e durabilidade do concreto [NEV 1978] [TRO 1968] [HAQ 1981], apud. [AHM 1989].

3.3.5.3 Mercado de Areia Artificial

O mercado de areias na Grande São Paulo é da ordem de 2 milhões m³/mês. Para cada m³ de brita produzida, é consumido 1,5 m³ de areia, sendo que a areia artificial produzida pelas pedreiras corresponde a aproximadamente 5% deste volume, ou seja, cerca de 100 mil m³/mês [MIN 2000].

Tomando como base a Revista Brasil Mineral, n.º 190, Dezembro 2000, através da entrevista do Eng.º Tasso de Toledo Pinheiro, presidente do SINDIPEDRAS, temos a seguinte estimativa da Produção Nacional de Areia Artificial:

Tabela III.9 Estimativa Produção Areia Artificial

Região	Produção milhões de m ³ /ano	
	Pedra Britada	Areia Artificial
Região metropolitana São Paulo	19	1,33
Estado de São Paulo	38	2,66
Brasil	76	5,32

Notas:

- a) Pedra Britada: agregados graúdos e miúdos (areia artificial)
- b) Produção de Areia Artificial estimada em 7% da produção total de pedra britada.

Segundo [BUC 1986], no mundo inteiro, anualmente, são utilizados mais de 5 bilhões de toneladas de agregado, em função das 800 milhões de toneladas de cimento consumidas. O consumo de cimento *per capita* é variável, dependendo de fatores, aliando-se "... uma alta densidade populacional junto com um grande consumo de cimento por habitante, o problema se agrava de maneira muito mais rápida: em determinadas regiões da Alemanha, Inglaterra e Japão, literalmente não se dispõem mais de agregados e, é necessário importá-los, por via marítima, de outros países ou de lugares bastante distante".

No Brasil constata-se a ocorrência de manifestações na área metropolitana de São Paulo, que vem se constituindo numa região-problema, no que diz respeito ao agregado miúdo.

Os agregados, areia e brita, representam o setor mineral onde atualmente se concentra uma das maiores explorações voluntárias do País, atingindo a produção bruta anual de, aproximadamente, 200 milhões de toneladas. O consumo per capita nacional é de cerca de 1,4 toneladas, enquanto em São Paulo o consumo gira em torno de 4 toneladas.

A região metropolitana de São Paulo foi a maior consumidora de areia para construção civil do país, consumindo cerca de 25 milhões de m³ no ano de 1986. Isto representa algo próximo de 40 milhões de toneladas, anualmente [BUC 1986].

3.3.5.4 Produção de Areias Artificiais

As areias artificiais são obtidas pela trituração mecânica de rochas e passam pelas seguintes etapas de fabricação:

- trituração mecânica das rochas
- peneiramento e lavagem, em alguns casos, dos agregados miúdos, para a obtenção das faixas de areias preconizadas pela NBR 7211 – ABNT:

Faixa 1 - muito fina

Faixa 2 - fina

Faixa 3 - média

Faixa 4 – grossa

A privatização de rodovias, construção de novos pedágios, limitações impostas por balanças, elevação nos preços dos combustíveis e o aumento das distâncias entre os centros produtores e os consumidores de areia quartzosa natural, por conta do esgotamento de antigas jazidas e das restrições ambientais, provocaram grande aumento nos custos de transporte do material, o que está viabilizando o crescimento da produção de areia quartzosa natural próximo dos grandes centros consumidores.

De acordo com Lígia Neves [LIG 2001], a areia artificial pode ser obtida, principalmente, por dois processos distintos: desmonte hidráulico e britamento de rochas [Revista Minérios & Minerales, 2000 - Agosto].

3.3.5.4.1 Desmonte Hidráulico

O desmonte hidráulico consiste em um jateamento de água com certa pressão sobre um maciço granítico. O impacto água/rocha faz com que a areia percorra certa trajetória até um tanque; o processo separa por meio de peneiramento, a areia que vai para o tanque ou bacia de rejeitos, que são geralmente argilas e outros materiais formados por partículas muito finas.

Na instalação com hidrociclones para classificação de areia, os rejeitos formados por esta lama são realimentados aos ciclones para recuperação de uma certa fração granulométrica de areia. Conforme a pesquisadora Ligia Neves, este processo é recente e está em implantação. As areias abaixo das malhas 100 mesh a 200 mesh vão para os silos e estão prontas para embarcar.

O material particulado na granulometria abaixo de 2 mm e acima de 0,075 mm já é considerado como areia artificial para o uso em construção civil, especialmente em pavimentação, onde os grãos possuem formatos angulosos e texturas rugosas, cujas aplicações requerem compactação mais seca do que para o concreto estrutural que exige uma massa mais fluida. É condição fundamental para este tipo de extração de areia que a rocha seja um maciço granitóide intemperizado *in situ* [LIG 2001].

A partícula de areia artificial obtida pelo processo de bacia ou tanque natural de decantação de rejeitos, lama argilosa tem aplicação e dosagem igual à areia natural usada em pavimentação. O grão de areia natural, por ser mais redondo, incorpora menos ar e preenche mais vazios, tendo maior aplicação em concreto do que a areia artificial.

No entanto, há diversos estudos que contrariam esta premissa e outros em desenvolvimento. As últimas normas sobre o tema datam de 1982 e, devido a isso, o desenvolvimento tecnológico fica prejudicado na medida em que não descreve o estágio atual das granulometrias disponíveis no mercado. Como consequência, o consumidor final tem dificuldade em encontrar areia de qualidade [LIG 2001].

Portanto, se por um lado a areia artificial obtida por desmonte hidráulico pode apresentar menor grau de resistência mecânica no concreto, a areia natural de leito de rio possui resíduos orgânicos e impurezas húmicas, que são constituintes deletérios do concreto. Estes resíduos, informa Lígia, são incomuns nas areias artificiais obtidas, tanto por desmonte hidráulico, como por britagem. Para os rejeitos obtidos com estes processos ainda não foram encontradas aplicações comercialmente viáveis, porém espera-se ser possível o aproveitamento de 100% da lama do rejeito e, para tanto, ainda são necessários estudos científicos.

3.3.5.4.2 Britagem das Rochas

Existem dois fatores fundamentais na produção de finos de brita, que são a litologia da rocha e as características dos equipamentos de britagem, os quais consideram desde o desmonte até o beneficiamento final que é o peneiramento. Atualmente, a produção de finos é bastante alta, podendo representar cerca de 40% a 50% da produção de uma planta de agregados.

Nas pedreiras onde é viável a produção comercial de areia artificial, ela é obtida por processos de lavagem e peneiramento em circuito fechado com hidroclones ou peneiras desaguadoras ou ainda desaguador de canecas, resultando num produto de granulometria em torno de 2 mm, sendo o restante do material considerado como super fino, abaixo da malha de 100 mesh ou 200 mesh é destinado às bacias ou tanques de decantação. Há estudos para aplicação desse material em determinados teores (7% a 20%) que, dependendo da litologia, pode ser usado no preenchimento dos vazios existentes em certas faixas granulométricas, colaborando na melhora da aglomeração das partículas maiores no concreto e não interferindo na sua resistência mecânica.

Nas obras do Complexo Canoas (UHE-CESP), a areia artificial britada, de rochas basálticas, é produzida por equipamentos denominados comercialmente de “Barmac”, que são dois britadores tipo Impactor, de eixo vertical, que operam no interior de uma câmara de britagem como uma bomba centrífuga, lançando fragmentos de rocha em alta velocidade contra a parede plenamente revestida por rocha. A redução do tamanho do

material se dá pelo impacto rocha contra rocha. O material resultante deste processo se apresenta de forma esférica, com produção horária de 15 m³ aproximadamente, teor de finos (<75 µm) da ordem de 14% [SAL 1998].

3.3.6 A Extração dos Agregados e o Meio Ambiente

A extração das areias naturais, conforme Figuras 3.3, 3.4 e 3.5, não podem provocar erosões e danos irreparáveis ao meio ambiente, assim como a extração das areias artificiais, originárias do britamento de rochas, principalmente rochas calcárias, deve preservar as grutas (fruto do trabalho incessante da natureza), assim como os tesouros nelas contidos (marcas do homem pré-histórico).



Figura 3.3 Extração da areia quartzosa natural



Figura 3.4 Extração da areia quartzosa natural



Figura 3.5 Extração de areia quartzosa natural

A extração de minerais interfere no meio ambiente, sendo necessária uma avaliação prévia da compatibilidade do seu desenvolvimento com a preservação ambiental, evitando-se assim danos irreparáveis provocados pela mineração.

Qualquer tipo de empreendimento, seja minerário, agrícola ou industrial, provoca modificações ambientais; a exploração da areia, cascalho e argila provoca danos na maioria dos casos reversíveis, desde que devidamente previstos e avaliados.

Segundo [BRU 1997] os principais impactos ocasionados pela extração dos bens minerais mencionados são os seguintes:

- Alteração da paisagem:

A operação de equipamentos provoca modificações do relevo/paisagem nos locais de extração.

- Supressão da vegetação:

Provocada pela operação de equipamentos, pela disposição do material minerado e dos rejeitos e pelo transporte da produção, é considerado impacto direto e reversível, se houver manejo adequado da vegetação existente no local.

- Modificações na estrutura do solo:

A atividade minerária ocasiona alterações nas características do solo, provocando elevação do nível de compactação, de exposição solar e mudança na estrutura microbiológica, entre outras.

- Interferência sobre a fauna:

A remoção da vegetação, a modificação na estrutura do solo e o próprio desenvolvimento da atividade, entre outros fatores, provocam uma evasão ou mesmo alterações nos hábitos da fauna local. É reversível a partir da adoção de técnicas de manejo adequado da fauna.

- Compactação do solo:

Provocada pela movimentação dos equipamentos de extração, carregamento e transporte, interfere na permeabilidade do solo, dificultando ou mesmo impedindo a sua reabilitação natural e contribuindo para o arraste de sedimentos para os corpos d'água.

- Conflitos de uso dos recursos naturais:

O solo, a água e o ar têm os seus usos múltiplos definidos e de acordo com os hábitos locais. Deve ser meta constante das unidades de planejamento dos municípios a busca de uma compatibilização dos seus usos habituais com o desenvolvimento da atividade minerária, para minimizar os conflitos entre eles.

- Alteração nas calhas dos cursos d'água:

São provocadas pelo emprego de equipamentos de desagregação sobre os leitos dos cursos d'água, eliminando barramentos naturais ou introduzindo bancos de sedimentos, que podem interferir na direção e na velocidade do fluxo d'água.

- Alterações no nível do lençol freático:

Trabalhos de extração que atinjam o nível do lençol freático podem provocar a subsidência do terreno, acomodação de terra, colocando em risco edificações no entorno do empreendimento. O rebaixamento do nível d'água pode ocasionar a desativação de poços de captação d'água nas proximidades da extração.

- Trepidação:

Provocada principalmente pela movimentação de equipamentos de desmonte, carregamento e transporte, a trepidação ocasiona perturbações na estabilidade das edificações, estradas, pontes etc. existentes no entorno da área de extração.

- Poluição sonora:

Provocada principalmente pelos equipamentos de extração, carregamento e transporte, trazendo aumento de ruído na área de influência do empreendimento.

- Poluição atmosférica:

Tanto o processo extrativo quanto à estocagem e o tráfego de veículos ocasionam acréscimo nos índices de poluição atmosférica, não só pela possibilidade de agregação de partículas minerais à atmosfera, como também de gases e partículas provenientes da queima de combustíveis. Esse impacto é mais significativo nos períodos de seca.

- Contaminação por óleos e graxas:

O manuseio inadequado de óleos e graxas, a falta de manutenção de motores dos equipamentos, os vazamentos e ausência de medidas preventivas para evitar os lançamentos diretos nos corpos d'água e no solo, trazem danos ambientais significativos ao ecossistema, geralmente criando conflitos de uso desses recursos.

- Instabilidade de margens e taludes:

O revolvimento do fundo dos corpos d'água, a extração efetuada próximo das margens, e ainda a declividade do terreno, associada ao tipo de solo que compõe os taludes, ocasionam a sua instabilidade.

- Turbidez das águas:

O processo extrativo gera áreas de turbilhonamento, com a conseqüente diluição de partículas sólidas nas águas, o lançamento de efluentes e também a exposição de solos desnudos, em especial nas áreas de preservação permanente, propiciando o carregamento de partículas sólidas para os corpos d'água e aumentando a turbidez das águas, o que motiva a ocorrência de conflitos de uso do recurso.

- Efluentes líquidos:

A drenagem natural, a lavagem dos materiais para separação dos minerais, e as chuvas geram efluentes líquidos – constituídos de partículas finas e água – que devem ser tratados antes do seu retorno aos corpos d'água. Por sua vez, as atividades humanas geram esgotos sanitários de alto potencial poluidor.

- Resíduos sólidos:

A movimentação de terra para a extração mineral ocasiona a formação de leiras de solo orgânico e estéril, que devem ser tratadas para não se tornarem focos de sedimentos. O desmonte das leiras e a sua total utilização na reabilitação da área devem ser previstos e dimensionados desde a fase de planejamento do empreendimento. As atividades humanas, também, aliadas ao processo extrativo, geram resíduos sólidos (lixo).

- Alterações no tráfego:

Necessariamente ocorrerão modificações no fluxo de veículos de transporte e de extração do minério, contribuindo para o aumento dos índices de poluição atmosférica e sonora, da trepidação e dos riscos de acidentes de trânsito.

- Conflitos de uso da água e do solo:

O desenvolvimento da extração minerária afeta a qualidade da água e do solo para outros usos, provocando conflitos.

Existe uma preocupação mundial com a reciclagem das frações finas (resíduos) dos agregados miúdos. Nos Estados Unidos, uma fundação denominada National Stone, Sand & Gravel Association dedica-se a pesquisar aplicações para esses agregados.

Um dos centros de pesquisas especializados em agregados, o International Center for Aggregates Research (ICAR, 2001), desenvolveu um projeto de pesquisa com início em setembro de 1995, com enfoque em Engineering Uses For Aggregates Fines, tendo cinco objetivos principais:

1. Estabelecer um comitê técnico para assistência às empresas que têm problemas com finos;
2. Identificar o volume em escala industrial;
3. Desenvolver um documento que retrate a análise técnica e econômica para identificar as possíveis destinações dos finos;
4. Preparar sugestões de políticas viáveis para o uso dos finos com o objetivo de novas pesquisas;
5. Desenvolver pesquisas de cunho técnico, científico e comercial.

Ainda nos Estados Unidos, os finos são utilizados em escala industrial, controlados rigorosamente pelas duas maiores entidades: National Crushed Stone Association (NCSA) e a North Carolina Department of Transportation (NCDOT).

No Brasil e no mundo, a preocupação com o meio ambiente vem crescendo continuamente desde a Conferência das Nações Unidas, realizada em Estocolmo em 1972 [LIG 2001]. Um dos fatores desencadeante deste processo foram os impactos ambientais causados em diversos tipos de empreendimentos, como as pedreiras por exemplo.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução CONAMA (1995), art.1º, considera impacto ambiental: “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam:

- I – a saúde, a segurança e o bem estar da população;
- II – as atividades sociais e econômicas;
- III – a biota (conjunto dos seres animais e vegetais de uma região);
- IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V – a qualidade dos recursos ambientais.

Impactos ambientais, causados pela extração de agregados, incluem erosão de rios e costas marítimas, perda do habitat biológico, ruído de localização, poluição pela dispersão de finos (pós) e aumento de transporte rodoviários [WOO 1997], apud. [GLE 2003]. Uma das alternativas para a preservação dos depósitos naturais de agregados são as rochas britadas, cada vez mais utilizadas [GLE 2003].

3.3.7 Exigências ABNT

A NBR 7211 – ABNT estabelece as seguintes exigências para os agregados:

3.3.7.1 Agregado Miúdo

a) Granulometria

A granulometria, determinada segundo a NBR 7217, deve cumprir os limites de somente uma das zonas indicadas na Tabela III.10. Podem ser utilizadas areias cuja granulometria não se enquadrem em qualquer uma das zonas indicadas na Tabela III.10, desde que sejam realizados estudos prévios de dosagem ou então a faixa granulométrica seja de uso consagrado em determinada região. Após definido o emprego de uma zona somente deve ser aprovada após o estudo de dosagem.

Tabela III.10 Zonas NBR 7211 Agregado Miúdo

Peneira ABNT	Porcentagem, em peso, retida acumulada na peneira ABNT, para			
	Zona 1 (Muito Fina)	Zona 2 (Fina)	Zona 3 (Média)	Zona 4 (Grossa)
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8 mm	0 a 5 (A)	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4 mm	0 a 5 (A)	0 a 15 (A)	0 a 25 (A)	5 (A) a 40
1,2 mm	0 a 10 (A)	0 a 25 (A)	10 (A) a 45 (A)	30 (A) a 70
0,6 mm	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3 mm	0 a 85 (A)	60 (A) a 88 (A)	70 (A) a 92 (A)	80 (A) a 95
0,15 mm	85 (B) a 100	90 (B) a 100	90 (B) a 100	90 (B) a 100

(A) Pode haver uma tolerância de até no máximo cinco unidades de por cento em um só dos limites marcados com a letra A ou distribuídos em vários deles.

(B) Para agregado miúdo resultante do britamento, este limite pode ser 80.

b) Substâncias Nocivas

As quantidades de substâncias nocivas não devem exceder os limites máximos em porcentagem da massa do material:

- Torrões de argila, determinados de acordo com a NBR 7218.....1,5
- Materiais carbonosos, determinados de acordo com a ASTM C123:
 - em concreto cuja aparência é importante0,5
 - nos demais concretos1,0
- Materiais pulverulentos, determinados de acordo com a NBR 7219:
 - em concreto submetido a desgaste superficial0,5
 - nos demais concretos.....5,0

Nota: Estes limites podem ser aumentados para 5% e 7% em massa, respectivamente, quando o material passa pela peneira ABNT – 0,075 mm constituído totalmente de grãos gerados durante o britamento de rocha.

c) Módulo de Finura

O módulo de finura do agregado miúdo, cuja granulometria cumpre com qualquer uma das zonas indicadas na Tabela III.10, não deve variar de mais de 0,2 para o material de uma mesma origem.

d) Impurezas Orgânicas

O agregado miúdo, submetido ao ensaio de acordo com a NBR 7220, não deve apresentar uma solução mais escura do que a solução padrão.

3.3.7.2 Agregado Graúdo

a) Granulometria

A granulometria determinada segundo NBR 7217, deve cumprir os limites indicados para o agregado graúdo. Os requisitos granulométricos do agregado graduado são os indicados na Tabela III.11.

Tabela III.11 Zonas NBR 7211 Agregado Graúdo

Graduação	Porcentagem retida acumulada, em peso, nas peneiras de abertura nominal, em mm, de												
	152	76	64	50	38	32	25	19	12,5	9,5	6,3	4,8	2,4
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0 – 10	-	80 – 100	95 – 100
1	-	-	-	-	-	-	0	0 – 10	-	80 – 100	92 – 100	95 – 100	-
2	-	-	-	-	-	0	0 – 25	75 – 100	90 – 100	95 – 100	-	-	-
3	-	-	-	0	0 - 30	75 – 100	87 – 100	95 – 100	-	-	-	-	-
4	-	0	0 – 30	75 - 100	90 – 100	95 – 100	-	-	-	-	-	-	-
5 (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

b) Substâncias Nocivas

As quantidades de substâncias nocivas não devem exceder os limites máximos em porcentagem do peso do material:

- Torrões de argila, determinados de acordo com a NBR 7218
 - em concreto cuja aparência é importante1,0
 - em concreto submetido a desgaste superficial.....2,0
 - nos demais concretos.....3,0
- Materiais carbonosos, determinados de acordo com a ASTM C 123
 - em concreto cuja aparência é importante0,5
 - nos demais concretos1,0
- Materiais pulverulentos, determinados de acordo com a NBR 7219.....1,0

c) Forma dos Grãos

O índice de forma dos grãos do agregado, não deve ser superior a 3, quando determinado de acordo com a NBR 7809.

d) Abrasão Los Angeles

A abrasão Los Angeles determinada segundo a NBR 6465 deverá ser inferior a 50%, em peso, do material.

3.4 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais e seus efeitos são conhecidos pelo homem há muito tempo. Os gregos e romanos utilizavam certos materiais vulcânicos, finamente moídos, junto à cal e à areia, produzindo argamassas mais duráveis e resistentes quando submersas em água. Os produtos vulcânicos de melhor qualidade eram encontrados ao redor do Monte Pozzuoli, nas proximidades do Vesúvio, os quais foram denominados pozolanas.

[ZAM 1993], apud. [RIG 1998], define os materiais pozolânicos da seguinte forma: "Atualmente considera-se pozolânico todo material natural ou artificial, silicoso ou silicoaluminoso, que por si só não possui nenhuma atividade hidráulica (não reage isoladamente na presença de água). Quando finamente moído, entretanto, exibe a capacidade de se combinar com o hidróxido de cálcio em meio aquoso e à temperatura ambiente, proporcionando a formação de novos compostos com propriedades cimentícias e insolúveis em água (silicatos de cálcio hidratados). Não se consideram pozolanas, entretanto, aqueles materiais que necessitam de condições excepcionais de finura e/ou tratamento hidrotermal para poderem reagir com o hidróxido de cálcio e formar compostos hidraulicamente ativos".

Fornos de usinas que empregam carvão como combustível e fornos metalúrgicos que produzam ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro-silício são as maiores fontes de subprodutos, os quais estão sendo produzidos num volume de milhões de toneladas a cada ano em muitos países industrializados [MEH 1994].

Por razões ecológicas [MEH 1994] e econômicas, tem-se aumentado gradativamente a quantidade de subprodutos pozolânicos e cimentícios adicionados ao cimento Portland durante sua fabricação. Esses materiais, normalmente, reduzem a velocidade de desenvolvimento de resistência do cimento Portland resultante. As reações entre as adições e os produtos de hidratação do cimento produzem redução significativa da porosidade da matriz e da zona de transição, melhorando a resistência final e a estanqueidade. As adições minerais aumentam particularmente a resistência à tração do concreto.

Os materiais pozolânicos mais utilizados são: cinzas volantes (fly ash), microssílica (sílica ativa ou sílica de fumo) e escórias de alto forno.

3.5 ADITIVOS QUÍMICOS

Conforme a NBR 11768 temos os seguintes aditivos químicos:

- plastificante
- retardador de pega
- acelerador de pega
- superplastificante
- incorporador de ar

Os aditivos afetam a qualidade dos concretos (resistência mecânica, durabilidade, etc..) conforme as suas características. Os aditivos incorporadores de ar (AI) diminuem a resistência do concreto, pelo aumento da porosidade, mas são imprescindíveis para os concretos dos ciclos de congelamento/descongelamento. Os aditivos aceleradores (A) ou retardadores (R) influenciam o desenvolvimento da resistência, não afetando significativamente a resistência final. Entretanto, muitos pesquisadores têm enfatizado a tendência de maior resistência final do concreto quando a velocidade de desenvolvimento de resistências a baixas idades é reduzida [MEH 1994].

3.6 ÁGUA

É usual dizer-se que a água que serve para beber pode ser utilizada na confecção de concretos. A recíproca, porém não é verdadeira, pois muitas águas utilizáveis sem dano no concreto não podem ser ingeridas pelo homem [PET 1978].

O excesso de impurezas na água de amassamento pode afetar a resistência e o tempo de pega do concreto, e provocar ocorrência de eflorescência (depósito de sais na superfície do concreto) e corrosão da armadura passiva ou protendida [MEH 1994].

São consideradas satisfatórias as águas potáveis, com pH entre 5,8 e 8,0, e que respeitem os seguintes limites máximos, segundo NBR 6118:

- matéria orgânica (expressa em oxigênio consumido) 3 mg/l
- resíduos sólidos 5000 mg/l
- sulfatos (expressos em íons SO_4^{--})..... 600 mg/l
- cloretos (expressos em íons Cl^-) 1000 mg/l

- açúcar..... 5 mg/l

3.7 RESUMO DE PESQUISAS, ARTIGOS PUBLICADOS E UTILIZAÇÕES DA AREIA ARTIFICIAL

3.7.1 Concreto Alta Resistência Com Diferentes Agregados Miúdo [DON 2002]

H. Donza [DON 2002], em trabalho de pesquisa, publicado em *Cement And Concrete Research* 32 (2002), estudou a influência de diferentes agregados miúdos nas propriedades do Concreto de Alta Resistência (High-Strength Concrete - HSC).

As características dos agregados (Tabela III.12) e das misturas (Tabela III.13), os resultados (Tabela III.14 e Tabela III.15) e as conclusões foram as seguintes:

3.7.1.1 Agregados

- areia silicosa natural de rio (natural sand) (NS)
- areia britada de granito (granite crushed sand) (GS)
- areia britada de calcário calcítico (limestone crushed sand) (LS)
- areia britada de calcário dolomítico (dolomite crushed sand) (DS)
- pedra britada de granito ($D_{\text{máx.}}$: 16 mm)

3.7.1.2 Graduação e características físicas agregados miúdo

Tabela III.12 Graduação e características físicas dos agregados finos

	Porcentagem retida acumulada			
	Silicosa (NS)	Granito (GS)	Calcário (LS)	Dolomita (DS)
9,5 mm (3/8 in)	0	0	1	0
4,75 mm (no.4)	1	0	6	3
2,36 mm (no.8)	12	28	38	39
1,18 mm (no.16)	51	56	61	63
600 µm (no.30)	74	69	75	73
300 µm (no.50)	96	78	81	78
150 µm (no.100)	100	84	86	82
Pó (< 75 µm)	0	10,7	10,6	13,3
Módulo de finura	3,34	3,15	3,48	3,38
Densidade relativa	2,64	2,69	2,68	2,77
Vazios (%)	33	32	34	38
Forma	Arredondada	Angular	Angular	Alongada
Textura superfície	Lisa	Cristalina	Áspera	Áspera

3.7.1.3 Características misturas

Tabela III.13 Proporções das Misturas

Mistura	S-530	G-530	G-485	G-450	D-485	L-485	L450	D-450
Cimento Portland (kg/m ³)	530	530	485	450	485	485	450	450
Água (kg/m ³)	160	160	160	160	169	168	160	175
Areia (kg/m ³)	660	660	698	727	720	702	736	724
Agregado graúdo (kg/m ³)	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030
Superplastificante (%massa cimento)	0,67	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Relação a/c	0,30	0,30	0,33	0,36	0,35	0,35	0,36	0,39
Slump (mm)	180	170	160	120	80	175	140	n.s.*

*Não slump.

3.7.1.4 Resultados

Tabela III.14 Tração por compressão diametral (MPa)

Mistura	Idade (dias)		
	28	90	365
S-530	3,36	3,44	3,59
G-530	3,27	3,45	4,08
G-485	3,84	3,94	4,54
L-485	3,90	4,03	4,09
D-485	3,62	3,81	4,39

Tabela III.15 Resistência compressão (MPa)

Mistura	Idade (dias)		
	28	90	365
L-450	53,5	55,0	61,0
G-450	54,3	56,8	62,5
G-485	62,1	67,1	71,8
L-485	54,6	61,4	63,2
D-485	51,0	56,8	65,4

3.7.1.5 Considerações

- (1) HSC com similar ou melhor resistência do que concreto com Areia Natural pode ser produzido usando areia britada como agregado fino.
- (2) O efeito de areia britada no concreto fresco apresenta algumas desvantagens comparada com areia natural. Areia britada requer uma dosagem maior de aditivo devido a forma e a textura das partículas. Para cada tipo de areia e conteúdo de cimento na mistura, a dosagem ótima de aditivo precisa ser estudada.
- (3) A forma e a textura das partículas da areia britada tem um importante efeito na interface entre a pasta e as partículas de agregado, ocasionando uma

melhoria da resistência do concreto. Areia britada de granito aparece como a mais vantajosa para esta finalidade no presente estudo.

3.7.2 Pavimento de Concreto para Aeroporto [REL 1983]

A oferta insuficiente de areias quartzosa natural, em qualidade e quantidade, na região da obra, direcionou a solução do problema para a produção (britagem, peneiramento e lavagem) de areia artificial de calcário, utilizada com desempenho excelente no concreto de cimento Portland, com as seguintes características e resultados:

a) Resistência Característica Tração na Flexão

- $F_{tk} = 4,55 \text{ MPa}$

b) Materiais Componentes

- Cimento Portland comum: Campeão CP 320
- areia quartzosa lavada média: Lapa Vermelha
- areia artificial calcário média: Lapa Vermelha
- brita nº 2 de calcário: Lapa Vermelha
- aditivo plastificante retardador (Master Builders 104 R) (0,27%)

c) Traço Unitário Peso

- 1 : 1,146 : 1,146: 3,165, a/c= 0,5

d) Consistência

- Slump: $(5 \pm 1,5)\text{cm}$

e) Consumo Materiais m^3 Concreto

- cimento (kg): 350
- areia quartzosa (h=4%) (m^3): 0,360
- areia artificial (h=3%) (m^3): 0,279
- brita nº 2 (m^3): 0,787
- aditivo MB 104 R (kg): 0,945

- água (kg): 175

f) Resultados Obtidos Idade 28 dias e Análise Resultados Conforme ACI 214-65

Tabela III.16 Resumo Resultados

Resistência Mecânica	Compressão Axial	Tração na Flexão
NBR ABNT	5739	12142
Número de Séries	32	32
Número de Corpos de prova por série	02	02
Resistência média (kgf/cm ²)	316	63,5
Desvio Padrão (kgf/cm ²)	24,7	7,8
Coefficiente de Variação (%)	7,8	12,2
Resistência Característica Estimada Compressão, fck, est (kgf/cm ²)	295,2	-
Resistência Característica Estimada Tração Flexão, fck, est (kgf/cm ²)	-	56,9

3.7.3 Lafarge/Mineração Brita Brás

Na Revista Beton News, n.º 59, JAN, FEV, MAR 2002, o uso da Areia Artificial de Pedras Britadas, denominada como Areia Especial de Calcário, é destacada.

Em um artigo técnico, de autoria de Cezar Bertola, temos as seguintes informações do material:

A Lafarge/Mineração Brita Brás investiu na modernização da mineração da Planta de Cajamar (SP) no período de fevereiro a março de 2001, visualizando a produção de agregados miúdos para atender o mercado de São Paulo. Entre os produtos que estão sendo produzidos, temos a areia especial de calcário, que tem mostrado uma eficácia muito grande na utilização em: concreto dosado em central e também no manufaturado em obra, em pré-fabricados, em telhas de concreto, em tubos de concreto para saneamento básico etc.

A areia especial de calcário produzida em Cajamar tem as seguintes características:

- Granulometria constante: devido ao seu peneiramento em tela 3,5 mm ter uma granulometria com diâmetro máximo de 2,4 mm e módulo de finura de 2,54; portanto, é areia média.
- Por ser produzida na última etapa do processo está isenta de quaisquer impurezas advindas da jazida.
- Na fase terciária de britagem, utiliza-se um britador rotativo da marca Canica (Tecnologia Canadense) que tem como característica tornar os grãos mais arredondados.
- Com os grãos mais arredondados teremos uma redução no teor de água a ser utilizado.
- Como esta areia tem sua origem numa jazida de calcário, incorpora a peça produzida uma cor acinzentada.
- O gráfico Idade x Resistência Compressão Axial, Figura 3.6, mostra duas misturas de concreto com o mesmo teor de cimento; a mistura que utiliza areia de calcário, apresenta em média 6,0 MPa de resistência maior do que a outra, que utiliza areia natural.

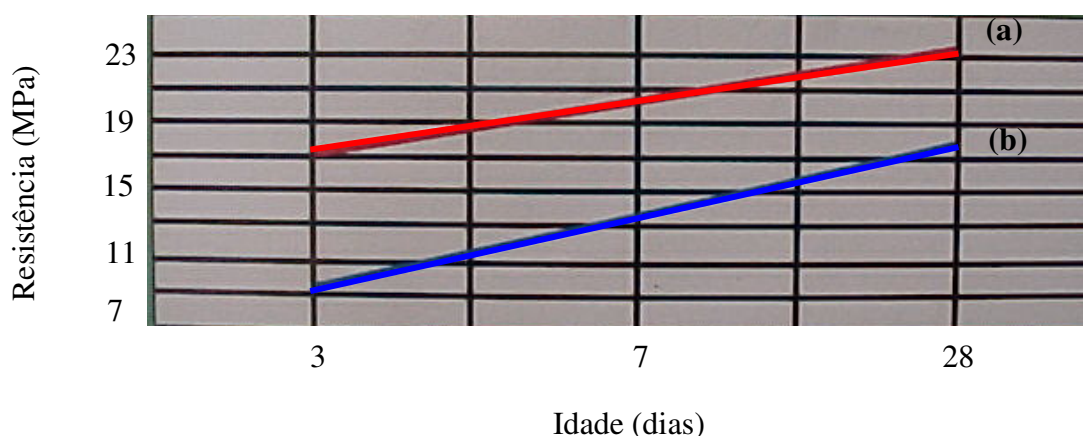


Figura 3.6 Desenvolvimento da resistência à compressão

(a) — 80% areia especial calcário + 20% areia quartzo

(b) — 100% areia quartzo

- Nos testes realizados nas misturas com areia especial de calcário, verificou-se aumento da impermeabilidade do concreto.

3.7.4. Areia artificial de basalto no Rio Grande do Sul

A areia natural utilizada na região norte do estado do Rio Grande do Sul é proveniente de lugares distantes (aproximadamente 300 km), fazendo com que seu custo chegue a níveis bem superiores comparados ao custo na fonte [TIE 2003].

O uso da areia artificial de basalto torna-se uma solução, devido às seguintes vantagens:

- produto alternativo, que causa menor degradação do meio ambiente, como o assoreamento dos rios quando da extração da areia natural;
- custo final do produto muito inferior: nesta região do estado existem muitas jazidas de basalto;
- economia no consumo de cimento (20 kg de cimento por m³ de concreto para determinada classe de concreto).

3.7.5. Pesquisadores produzem areia clonada (areia artificial) no Rio de Janeiro

O governo do estado sancionou lei que cria a Área de Proteção Ambiental da bacia do Rio Guandu. Com isso, fica proibida a exploração de areia no leito e nas margens dos rios Guandu, Macacos, Cacaria, Santana, São Pedro, Queimados e Ipiranga. Há muito tempo ambientalistas denunciam os danos ambientais provocados pelos areais, que também comprometem a qualidade da água que abastece o Rio. As leis ambientais estão se tornando cada vez mais rigorosas em relação às atividades dos areais, mas só agora uma alternativa para a produção de areia é apresentada [ROD 2002].

Partindo do princípio de que os areais causam danos ao meio ambiente, mas também que a construção civil precisa de areia, pesquisadores do Centro de Tecnologia Mineral (Cetem), que fica na Ilha do Fundão, estão desenvolvendo uma areia artificial. A areia clonada é produzida a partir dos resíduos de brita das pedreiras do estado [ROD 2002].

Grande parte da areia utilizada na construção civil vem hoje do leito dos rios, sendo que somente no estado do Rio de Janeiro, 400 milhões de toneladas de areia são consumidos em obras todos os anos.

Na britagem de rochas para a produção de agregados para concretos de cimento Portland e asfálticos, as pilhas de resíduos ficam acumulados nos pátios das pedreiras. O descarte chega a representar entre 25% e 30% do total do material desmontado nas rochas. Os pesquisadores do Cetem estudam a melhor forma de utilizar esse resíduo. O estudo traz uma solução para dois problemas ambientais: o destino final do rejeito das pedreiras e o fim da extração de areia dos rios [ROD 2002].

Além de provocar o assoreamento dos rios, as atividades dos areais são responsáveis pela suspensão de argila, deixando a água turva e dificultando o tratamento nas estações. Além disso, as escavações produzem lagos propícios ao surgimento do mosquito da dengue.

3.7.6 Areias artificiais de calcário em Minas Gerais

Lara & França et al [LAR 1996], em 1996, avaliaram a influência da utilização parcial de areia artificial de calcário, procedente da ICAL S/A, em substituição à areia natural, nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Através de traços experimentais, determinou-se a Curva de Abrams (a/c x resistência à compressão) para cada teor de areia artificial (0%, 30%, 40%, 50% e 70%) em concretos de idênticas características: consumo de cimento, teor de argamassa e consistência (slump).

As conclusões do estudo foram as seguintes:

- melhoria significativa das propriedades do concreto no estado fresco: maior coesão e retenção de água, principalmente nos concretos com baixos teores de cimento (<300 kg/m³).

- consumo de cimento (kg/m^3) inferior para todos os teores de areia artificial.

3.7.7 Areia artificial de basalto das obras do Complexo Canoas (UHE CESP)

O concreto empregado nas obras do Complexo Canoas – barragens das UHE Canoas I e UHE Canoas II, CESP, no rio Paranapanema, na região sudeste do estado de São Paulo, tem como agregado miúdo areia artificial, proveniente da britagem, de rocha basáltica, do material rochoso de escavação das fundações e das pedreiras exploradas nos canteiros da obra [SAL 1998].

A região não tem jazida de areia natural em condições de atender o projeto. As campanhas de investigação realizadas em trecho do rio Paranapanema, entre as usinas a montante e a jusante do empreendimento, e num raio de distância economicamente aceitável, a partir das obras, revelaram a inviabilidade de se empregar areia natural nas composições dos concretos [ABB 1994] apud. [SAL 1998], quer pela quantidade insuficiente e/ou contaminação do material, quer pela distância de transporte que provocaria alta acentuada no custo final dos concretos.

A CESP já havia usado em suas obras areia artificial com teores de até 30% em relação ao agregado miúdo. A partir do conhecimento de experiências de Itaipu (Foz do Areia, Salto Santiago e Segredo, usinas situadas na região sul do país, onde se empregou de 70% a 80% de areia artificial nos concretos), desenvolveu-se no Laboratório Central de Engenharia Civil em Ilha Solteira estudos de composições de concretos com 100% do agregado miúdo, oriundo da britagem do material rochoso de Canoas I. Os resultados deste estudo indicaram a viabilidade técnica e econômica do seu emprego [ABB 1994], apud. [SAL 1998].

3.7.8 Avaliação qualidade de areia artificial de calcário [REL 162]

Estudou-se o desempenho de agregado miúdo, originário do britamento de rochas calcárias, denominado areia artificial, misturado com areia quartzosa natural média, nas

proporções de 0%, 30%, 40%, 50% e 70%, em quatro misturas de concreto de cimento Portland ($f_{ck}=13,5$ MPa; 15 MPa; 18 MPa e 20 MPa).

Os resultados, média de 3 corpos-de-prova, por idade, estão relacionados na Tabela III.17, sendo os melhores resultados obtidos com a substituição de 50% de areia natural pela areia artificial.

Tabela III.17 Avaliação qualidade de areia artificial de calcário [REL 162]

Traço Nº	Fck (MPa)	Cimento (kg/m ³)	Idade dias	Resistência média compressão – MPa				
				Areia artificial - %				
				0	30	40	50	70
01	13,5	300	3	8,3	10,4	11,5	12,4	8,6
			7	13,9	13,9	14,8	15,7	13,3
			28	18,4	20,0	21,6	21,9	18,5
02	15,0	320	3	10,3	12,0	12,7	13,7	10,6
			7	17,0	16,9	16,4	18,9	16,7
			28	21,2	22,4	23,3	25,1	22,1
03	18,0	340	3	11,3	15,1	16,2	15,1	13,1
			7	18,0	20,2	21,7	20,8	19,3
			28	23,1	26,0	26,2	27,4	25,6
04	20,0	360	3	13,3	15,3	16,7	16,1	15,4
			7	21,0	21,0	22,4	22,3	21,1
			28	26,4	27,3	27,6	30,2	28,7

4 PARTE EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão descritas as etapas para a concretização dos objetivos do trabalho, as quais são as seguintes: descrição e caracterização dos materiais componentes do concreto, características das misturas, produção, ensaios e caracterização microestrutural dos concretos.

4.1 MATERIAIS COMPONENTES DO CONCRETO

4.1.1 Cimento Portland Composto CP II E32

4.1.2 Agregado Miúdo

a) Tipos:

- Areia Quartzosa Natural;
- Areia Artificial de Gnaisse;
- Areia Artificial de Calcário.

b) Composição:

- As areias, compostas por peneiramento, conforme NBR 7214 (Areia Normal Para Ensaio de Cimento), com composições e granulometria teórica, conforme Tabela IV.1 e Tabela IV.2, respectivamente:

Tabela IV.1 Composições das Areias

Fração	Graduação Entre Peneiras, em mm	%
Grossa	2,4 e 1,2	25
Média Grossa	1,2 e 0,6	25
Média Fina	0,6 e 0,3	25
Fina	0,3 e 0,15	25

c) Granulometria Teórica:

Tabela IV.2 Granulometria Teórica

Peneira (mm)	Porcentagem em peso		Zona 3 Média (NBR 7211)
	Retida	Acumulada	
6,3	0	0	0 – 7
4,8	0	0	0 – 11
2,4	0	0	0 – 25 (A)
1,2	25	25	10(A) – 45(A)
0,6	25	50	41 – 65
0,3	25	75	70(A) – 92(A)
0,15	25	100	90(B) - 100
Fundo	0	100	-
Módulo de Finura		2,50	
Diâmetro Máximo		2,40	

4.1.3 Agregado Graúdo

a) Tipos

- Brita n.º 0 de calcário;
- Brita n.º 1 de calcário

b) Composição

- Conforme graduações 0 e 1, NBR 7211.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.2.1 Cimento Portland Composto CP II E 32

Serão considerados os ensaios realizados pelos laboratórios do fabricante do produto, a saber:

4.2.1.1 Exigências Químicas

- NBR 5742 ABNT – Análise Química de Cimento Portland – Determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.
- NBR 5743 ABNT – Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo
- NBR 5744 ABNT – Cimento Portland - Determinação de resíduo insolúvel
- NBR 5745 ABNT – Cimento Portland – Determinação anidrido sulfúrico
- NBR 5747 ABNT – Determinação do óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama
- NBR 7227 ABNT – Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol
- NBR 11583 ABNT – Cimento Portland e matérias primas – Determinação de anidrido carbônico (CO₂) por gasometria
- NBR 5746 – Cimento Portland – Determinação de enxofre na forma de sulfeto

4.2.1.2 Exigências Físicas

- NBR 7215 ABNT – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão
- NM 65 ABNT – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.
- NM 76 ABNT – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)
- NBR 11579 ABNT – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrometros (número 200)

- NBR 11582 ABNT – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier

4.2.2 Agregado Miúdo

- NBR 7214 ABNT – Areia normal para ensaio de cimento
- NBR 7216 (NM-26) ABNT – Amostragem de Agregados
- NBR 7217 ABNT – Agregados – Determinação da composição granulométrica
- NBR 7218 ABNT – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis
- NBR 7219 ABNT – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos
- NBR 7220 ABNT – Agregado Miúdo – Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado
- NBR 7251 ABNT – Agregado em Estado Solto – Determinação da massa unitária
- NBR 9776 ABNT – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman
- NBR 9777 (NM 30) ABNT – Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos
- ASTM C-1260/01 – Reatividade potencial álcali-agregado
- ASTM C-114/97 – Determinação de álcalis solúveis de cimentos
- Procedimento Furnas 1.04.16 – Reatividade potencial álcali-agregado
- Procedimento Furnas 1.02.52 – Determinação de álcali solúveis de cimentos
- Procedimento Furnas 4.15.03 – Operação do difratômetro de Raios X
- Procedimento Furnas 4.15.04 – Preparação de amostras para difratometria Raios X
- Procedimento Furnas 4.15.11 – Análises por difração de Raios X.

4.2.3 Agregado Graúdo

- NBR 7216 (NM-26) ABNT – Amostragem de Agregados
- NBR 7217 ABNT – Agregados – Determinação da composição granulométrica
- NBR 7219 ABNT – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos

- NBR 7251 ABNT – Agregado em Estado Solto – Determinação da massa unitária
- NBR 7809 ABNT – Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro
- NBR 9937 ABNT – Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo
- ASTM C-1260/01 – Reatividade potencial álcali-agregado
- ASTM C-114/97 – Determinação de álcalis solúveis de cimentos
- Procedimento Furnas 1.04.16 – Reatividade potencial álcali-agregado
- Procedimento Furnas 1.02.52 – Determinação de álcali solúveis de cimentos
- Procedimento Furnas 4.15.03 – Operação do difratômetro de Raios X
- Procedimento Furnas 4.15.04 – Preparação de amostras para difratometria Raios X
- Procedimento Furnas 4.15.11 – Análises por difração de Raios X.

4.3 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS

Os concretos, num total de 11 (onze) traços, têm as seguintes características:

- Consumo de cimento: 350 kg/m^3 ;
- Relação água / cimento: 0,54;
- Consistência (Slump): $(70 \pm 10) \text{ mm}$;
- Proporção de areia artificial em relação à areia quartzosa de rio: 0, 20, 40, 60, 80 e 100 %;
- Teor de argamassa em relação ao total de materiais secos no concreto: $(46 \pm 1)\%$;
- Idade, dos concretos, para ensaios: 3 dias, 7 dias e 28 dias.

4.4 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

4.4.1 Mistura

A mistura dos materiais componentes dos concretos, será executada numa betoneira de eixo inclinado, capacidade 320 litros, conforme ilustrado na Figura 4.1, na seguinte ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura (Tabela IV.3).

Tabela IV.3 Ordem de colocação dos materiais na betoneira e tempo de mistura

Ordem	Material	Tempo mistura acumulado (min)
1°	Brita N.º 1	0
2°	Areias	5
3°	75% Água	10
4°	Cimento	15
5°	Brita N.º 0	20
6°	25% Água	25



Figura 4.1 Betoneira eixo inclinado, capacidade 320 litros

4.4.2 Adensamento Corpos de Prova

Adensamento vibratório, conforme NBR 5738, com vibrador de imersão (Figuras 4.2, 4.3 e 4.4).



Figura 4.2 Adensamento dos corpos de prova cilíndricos 100x200 mm



Figura 4.3 Adensamento dos corpos de prova cilíndricos 150x300 mm



Figura 4.4 Adensamento dos corpos de prova prismáticos 150x150x500 mm

4.4.3 Cura

Inicialmente, proteção dos corpos de prova com material não reativo e não absorvente com a finalidade de evitar a perda de água; 24 horas após a moldagem, desmoldagem e armazenagem em câmara úmida até a data dos ensaios.

4.4.4 Preparação dos topos dos corpos de prova

Retificação dos topos dos corpos de prova cilíndricos com retificadora (Figura 4.5) e capeamento com pasta de enxofre (Figura 4.6).



Figura 4.5 Retífica dos corpos-de-prova cilíndricos



Figura 4.6 Capeamento dos corpos-de-prova cilíndricos

4.5 ENSAIOS DOS CONCRETOS

4.5.1 Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR 7223 (NM 67) ABNT:

A trabalhabilidade é o parâmetro comumente usado para efetuar o controle da mistura do concreto fresco e pode ser determinada de várias maneiras.

A medida mais usual de trabalhabilidade é obtida pelo abatimento do tronco de cone (“slump test”) e é muito útil na detecção de variações da uniformidade de uma mistura de proporções nominais dadas [NEV 1982], assim como da sua coesão e retenção de água.

A Figura 4.7 ilustra a sequência de operações para a moldagem e medida da trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone [SCA 1986].

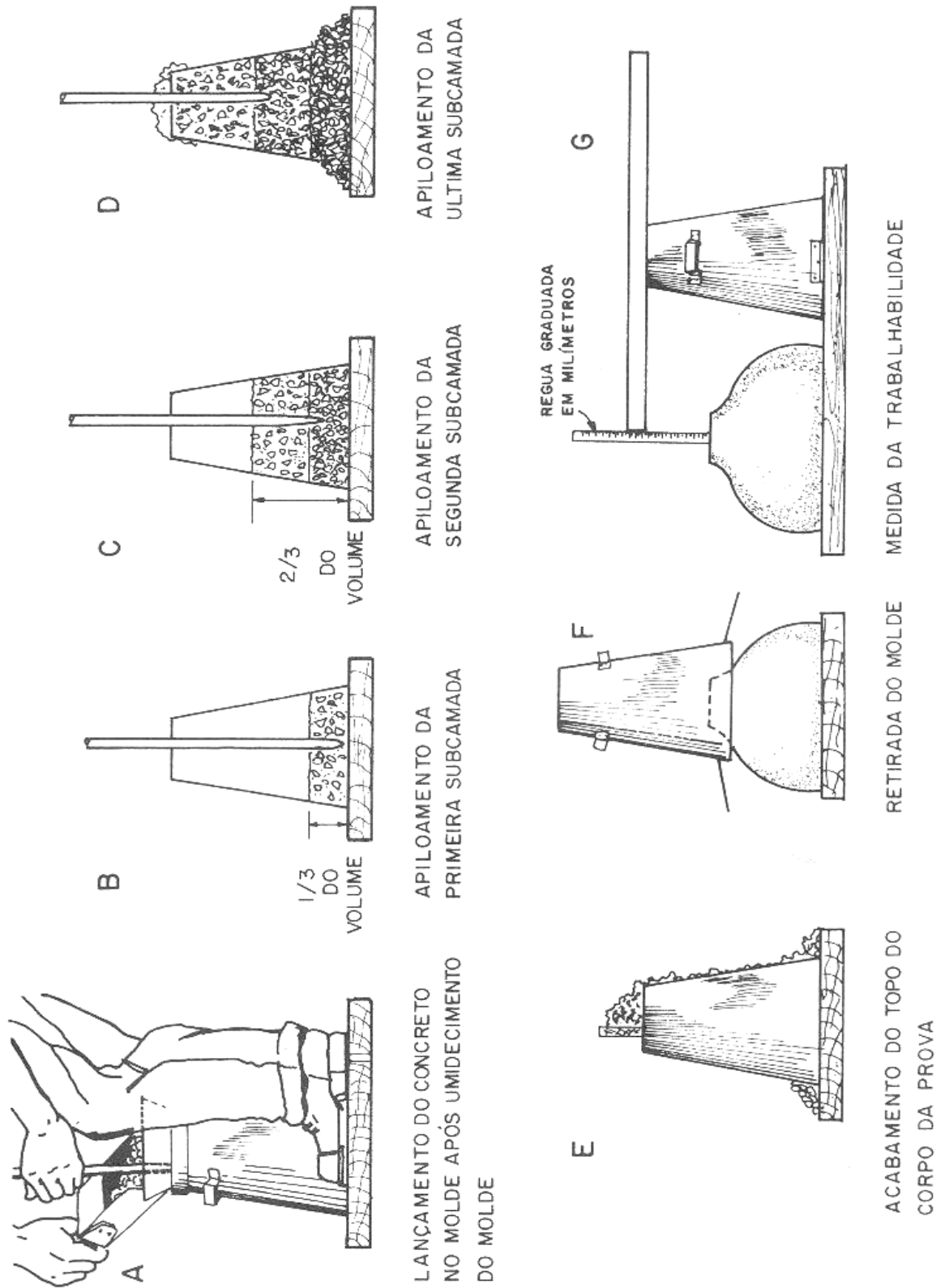


Figura 4.7 Sequência de procedimento para medida do abatimento (Slump)

4.5.2 Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – NBR 5738 – ABNT

4.5.3 Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – NBR 5739 – ABNT

4.5.4 Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos: NBR 12142 (MB 3483), ABNT

Esta norma prescreve o método para determinar a resistência à tração na flexão do concreto usando corpo-de-prova prismático, moldado e curado conforme NBR 5738, que recebe carregamento nos terços do vão, conforme Figura 4.8 e cujo valor é:

$$f_{ctm} = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (3.8)$$

onde P é a carga máxima aplicada, L a distância entre cutelos de suporte, b largura média do corpo-de-prova e d altura média do corpo-de-prova.

A norma similar americana é a ASTM C78, “Standard Test Method for Flexural Strength at Concrete”.

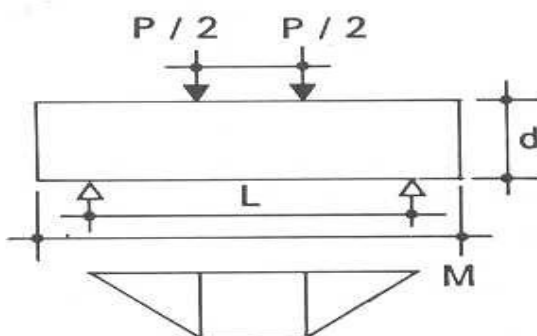


Figura 4.8 Ensaio de tração por flexão (carregamento no terço médio)

4.5.5 Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222, ABNT

Esta norma prescreve o método para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos de argamassa e concreto.

O método imaginado pelo engenheiro brasileiro Lobo Carneiro, conhecido internacionalmente como “método brasileiro”, consiste na compressão diametral do cilindro utilizado no ensaio de compressão. A distribuição das tensões principais no plano diametral mostra que para quase toda a seção existe uma tensão constante de tração, normal ao plano da seção e cujo valor é:

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (3.9)$$

onde P é a carga linear aplicada segundo uma geratriz, D o diâmetro e L o comprimento do corpo-de-prova, conforme Figura 4.9.

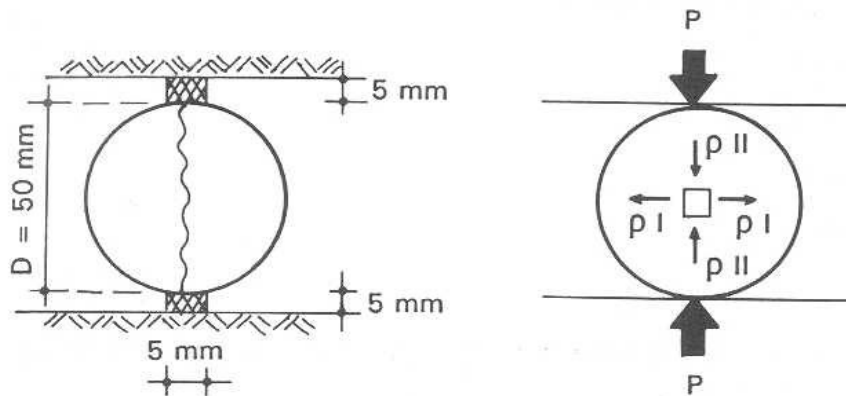


Figura 4.9 Princípio do ensaio da resistência à tração por compressão diametral

A norma similar americana é a ASTM C 496, “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.

4.5.6. Módulo de deformação ou elasticidade

4.5.6.1. Introdução

O concreto não é um material tipicamente elástico para qualquer estágio de carregamento; portanto, a lei de Hook, para o material concreto, é uma aplicação aproximada, e devido à não proporcionalidade, entre tensão e deformação, o módulo de deformação não é constante para qualquer intervalo de carga [SCA 1986].

Da Figura 4.10 nota-se que o módulo de deformação (inclinação da curva representativa da relação tensão-deformação) tem sido definido, para uma velocidade de carregamento preestabelecida, de três formas diferentes. O ponto “B” da curva corresponde a aproximadamente 40% da tensão de ruptura, em função de resultados experimentais que mostram que, até essa tensão, o concreto se comporta mais como um material elástico e a partir dela, mais como um material elasto-plástico:

- Módulo tangente inicial, obtido pelo ângulo α da tangente na origem da curva
- Módulo secante que é dado pelo ângulo β da secante à curva, entre os pontos A e B
- Módulo tangente final obtido pelo ângulo γ da tangente à curva do ponto B

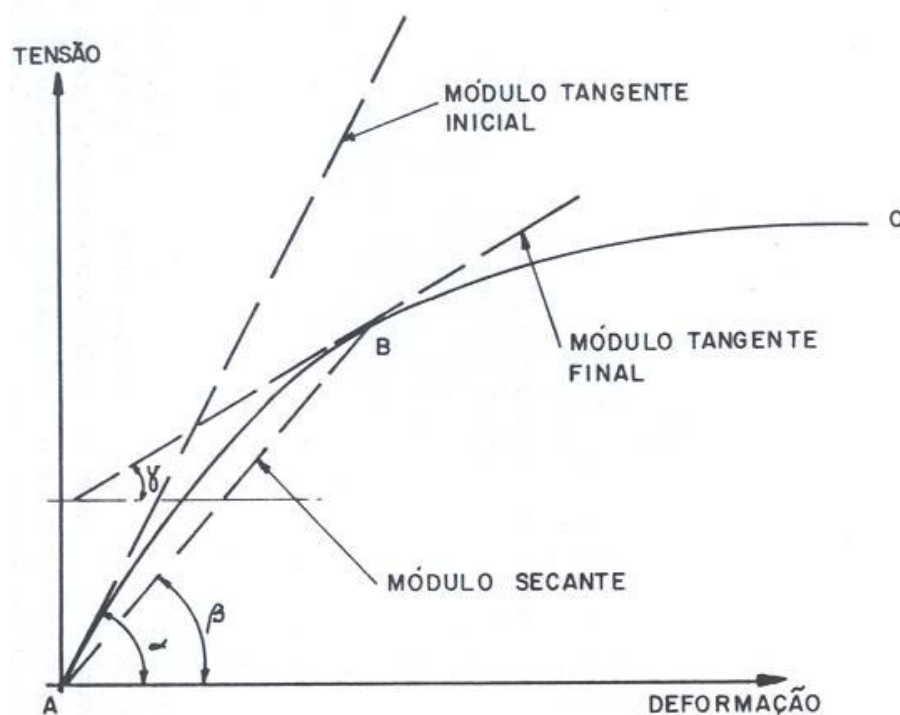


Figura 4.10 Curva típica de concreto submetida a um único carregamento

O módulo de deformação, quando determinado a partir do diagrama tensão-deformação, obtido de um único carregamento e a velocidade controlada, é denominado módulo de deformação estático.

Por definição, no entanto, o módulo de deformação do concreto tem sido conceituado como sendo a relação entre a tensão correspondente a uma parcela da tensão de ruptura daquele concreto (aplicada com velocidade controlada) e a deformação causada por esta tensão, correspondendo, portanto, na Figura 4.10, ao módulo secante.

O módulo de deformação estático do concreto sofre variações fundamentais em função dos seguintes fatores [SCA 1986]:

- Tipo e consumo de aglomerante;
- Idade do concreto;
- Tipo e quantidade do agregado;
- Porcentagem de ar incorporado.

4.5.6.2. Método de Medida do Módulo de Elasticidade Estático (E)

O módulo de elasticidade (ou módulo de Young) é a constante de proporcionalidade entre tensão e deformação.

Os procedimentos para determinação do módulo de deformação estático são muito variáveis ao se comparar as prescrições de várias normas internacionais. Comparando-as nota-se velocidades diferentes de carregamentos, limites diferentes para a carga máxima aplicada, pré-carregamentos em número e intensidade de carga também variáveis etc.

No Brasil, a determinação do módulo de deformação estático e coeficiente de Poisson do concreto tem sido feita, com base nas prescrições da ASTM C.469 através da medida das deformações transversais e longitudinais de corpos-de-prova cilíndricos.

As deformações são lidas no terço médio do cilindro, para o intervalo de carga de zero a 40% da carga de ruptura do concreto, na idade do ensaio, carregado a uma velocidade de $(0,25 \pm 0,035)$ MPa/min.

Os corpos-de-provas têm o diâmetro da base no mínimo igual a 3 vezes o diâmetro máximo de agregado e altura igual a 2 vezes o diâmetro da base. O concreto é submetido à cura padrão até a idade de ensaio.

A máquina para execução do ensaio deve ser capaz de aplicar a carga com precisão igual à necessária para ensaios de determinação da resistência à compressão e com a velocidade preestabelecida.

As deformações longitudinais podem ser obtidas por sistemas mecânicos afixados externamente ao corpo-de-prova, como mostrado na Figura 4.11, aparelhos elétricos colados na superfície (wire strain gages) ou embutidos na massa de concreto (strain meters).



Figura 4.11 Prensa universal de ensaios EMIC – PC200, computadorizada, utilizada na determinação do módulo de elasticidade estático

Independentemente do tipo de aparelho usado, a precisão requerida é de 5 micro strains (0,00005 mm/mm).

A determinação através de aparelhos externos (mecânicos ou elétricos) deve ser feita em duas linhas longitudinais diametralmente opostas e centradas à meia altura do corpo-de-prova. O comprimento efetivo de cada linha de medida deve ser maior ou igual a três vezes o diâmetro máximo do agregado e menor ou igual a $2/3$ da altura do corpo-de-prova. Esses procedimentos minimizam os efeitos de excentricidade de aplicação da carga e a influência dos pratos da prensa nos topos do corpo-de-prova.

Extensômetros embutidos (strain meters) são usados centrados no eixo longitudinal do corpo-de-prova, obedecendo às mesmas prescrições quanto a posicionamento e comprimento de medida descritas acima.

Imediatamente antes do ensaio, a tensão de ruptura do concreto deve ser determinada através de corpos-de-prova auxiliares moldados e curados nas mesmas condições.

Colocado o corpo-de-prova na prensa, aplica-se um pré-carregamento ao mesmo, até 40% da carga de ruptura prevista, para ajuste e verificação do desempenho dos aparelhos de medida.

Após esse pré-carregamento aplica-se continuamente e sem choque o carregamento na velocidade estabelecida registrando, sem interrupção, as deformações longitudinais a intervalos regulares, até a carga correspondente a 40% da carga de ruptura do concreto.

O cálculo do módulo de deformação é feito com base em um mínimo de dois carregamentos, através de valores médios das leituras das linhas longitudinais dos vários carregamentos, conforme ASTM C-469:

$$E = \frac{F_{c2} - F_{c1}}{e_2 - 0,00005} \quad (3.10)$$

E = módulo de deformação estático (MPa)

F_{c2} = tensão correspondente a 40% da carga de ruptura do concreto (Mpa)

F_{c1} = tensão inicial correspondente à deformação longitudinal de 0,00005 mm/mm (Mpa)

e₂ = deformação específica longitudinal provocada pela tensão F_{c2} (mm/mm)

4.5.6.3. Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d)

O princípio fundamental, base do método adotado, é o estudado por Rayleigh [RAY 1945] [MAL 1976], apud. [SCA 1986], referente à velocidade do som através de um material, e o estabelecimento de relação matemática entre a velocidade do som, a frequência de ressonância e o módulo de elasticidade do material.

Essas relações dizem respeito a um meio sólido, considerado homogêneo, isotrópico e perfeitamente elástico. Podendo, entretanto, ser aplicadas a um material menos homogêneo, como o concreto, desde que as dimensões sejam suficientemente grandes para minimizar a influência da heterogeneidade do material.

Dessa forma a velocidade do som (vibração mecânica) é correlacionada com as características de vibração, a massa específica e as características elásticas do meio.

Dentre os métodos usuais para verificação da vibração, o da frequência fundamental (de ressonância) é um dos mais usados. Esse método baseia-se na determinação da frequência fundamental de ressonância de vibração, gerada eletromecanicamente.

O método da frequência fundamental de ressonância é usado em laboratório para avaliar a evolução ou a uniformidade de propriedades de corpos-de-prova, normalmente avaliada através do módulo de elasticidade. Normalmente, o módulo de deformação assim determinado é denominado de módulo de elasticidade dinâmico.

A aparelhagem usada, conforme Figura 4.12, está esquematicamente mostrada na Figura 4.13.

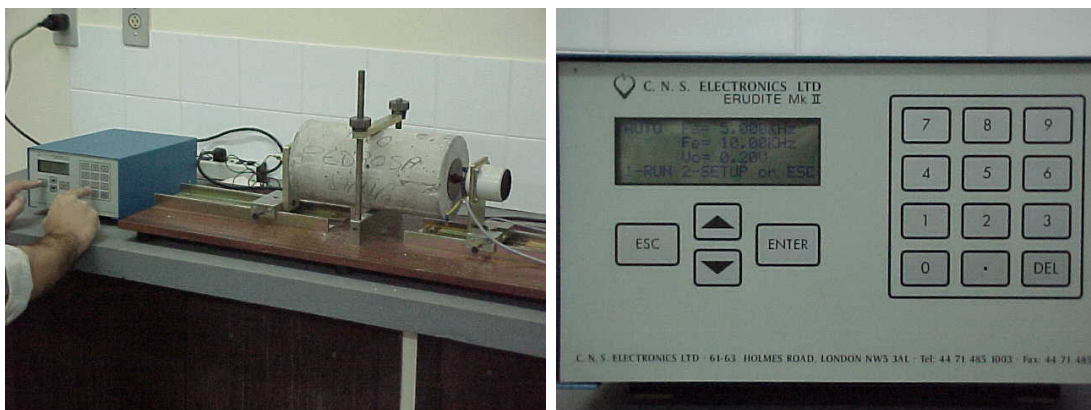


Figura 4.12 Conjunto de aparelhos para determinação da frequência fundamental

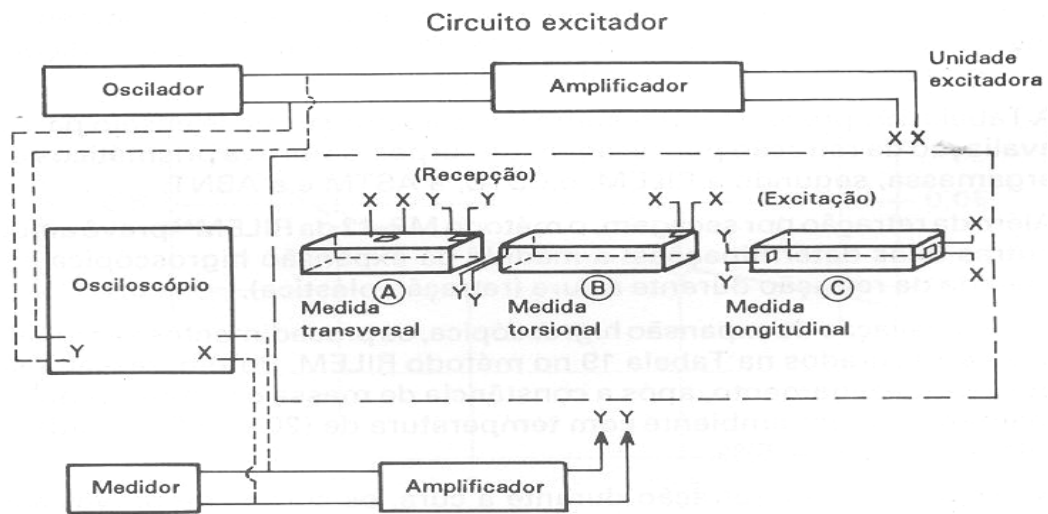


Figura 4.13 Esquema de medições das freqüências fundamentais de vibração

O módulo de elasticidade dinâmico é obtido conforme ASTM C-425 e método de ensaio MCC-09: CESP-T5:

$$E_d = \frac{4 L^2 \cdot F^2 \cdot P}{g} \times 10^{-6} \quad (3.11)$$

E_d = módulo de elasticidade dinâmico longitudinal, em N/mm²;

L = comprimento do corpo-de-prova, em metros;

F = freqüência de ressonância longitudinal, em hertz;

P = peso volumétrico, em N/m³;

g = aceleração da gravidade, em m/s².

4.6 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Para caracterização e análise estrutural dos concretos, serão utilizadas as seguintes técnicas:

4.6.1 Difração de Raios X (DRX)

Os raios X são radiações eletromagnéticas da mesma natureza que as radiações que compõem a luz branca visível ao olho humano. A produção de raios X está associada à perda de energia de elétrons, porém a quantidade de energia necessária para produzir um quantum de raios X é muito maior que aquela para produzir um quantum de luz visível. Por exemplo, diferenças de potencial de algumas centenas de volts produzem uma descarga em um gás com produção de luz visível, enquanto são necessárias algumas dezenas de quilovolts para produzir os raios X.

Os comprimentos de onda dos raios X são cerca de 1.000 vezes menores que os comprimentos de onda da luz visível e daí resultam grandes diferenças nas propriedades dos dois tipos de radiação: por exemplo, uma folha de alumínio de 1 mm de espessura é transparente aos raios X e é opaca à radiação branca. Existem, entretanto, propriedades comuns aos dois tipos de radiação; por exemplo, espectros de difração podem ser obtidos com ambos os tipos de radiação em condições determinadas [PAU 1991].

A Figura 4.14 é uma representação esquemática de um tubo de raios X: na parte superior, tem-se um filamento metálico que é aquecido por uma corrente elétrica. Uma diferença de potencial elevada (cerca de 40 KV) é aplicada entre o filamento e uma placa metálica (chamada anticátodo ou alvo) colocada no centro do tubo. Pelo aquecimento por uma pequena diferença de potencial, o filamento emite elétrons que são acelerados até energias elevadas, pela diferença de potencial entre o filamento e o anticátodo ou alvo (ânodo), os elétrons atravessam o tubo (que está em alto vácuo) e atingem o anticátodo ou alvo. Os átomos do alvo metálico absorvem a energia dos elétrons e reemitem essa energia como radiação X. Os raios X que são produzidos no alvo escapam do tubo através de uma janela e podem então ser utilizados para estudos cristalográficos.

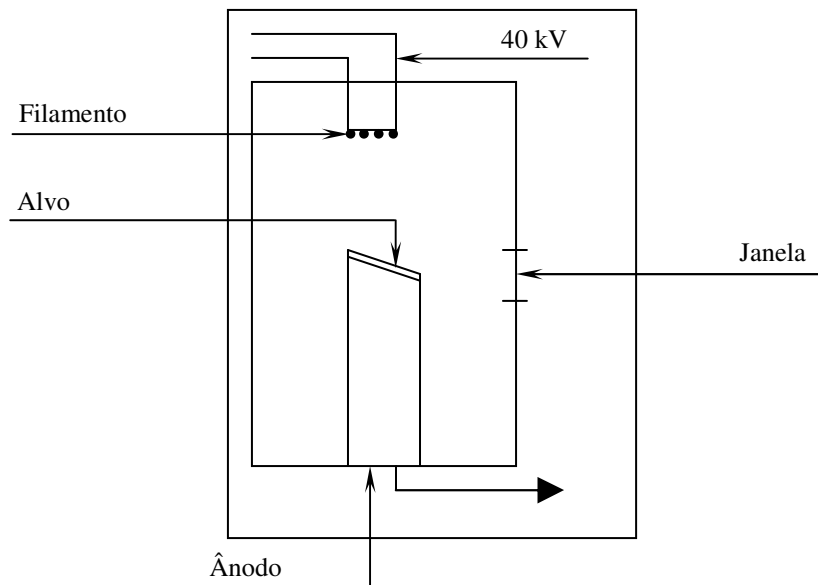


Figura 4.14 Representação esquemática tubo de raios X

A interação entre a radiação X e os elétrons da matéria por onde ela passa normalmente resulta em retroespalhamento. Quando os raios X são retroespalhados no interior de um cristal bem ordenado, ocorrem interferências (tanto construtivas como destrutivas) entre os raios retroespalhados, porque as distâncias entre os centros de retroespalhamento são da mesma ordem de magnitude do comprimento de onda da radiação, e o resultado deste efeito é a difração.

Quando um feixe de raios X atinge a superfície de um cristal com ângulo θ , uma porção é retroespalhada pela camada de átomos da superfície. A porção não espalhada do feixe penetra em direção à segunda camada de átomos onde, novamente, uma fração é retroespalhada, e a restante passa para atingir a terceira camada, como mostra a Figura 4.15. O efeito acumulado deste retroespalhamento, a partir de centros regularmente espaçados, constitui a difração do feixe. Os requisitos para que haja difração de raios X são [SKO 1992] [SIL 1996], apud. [RIG1998]:

- O espaçamento entre as camadas de átomos deve ser da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação.
- Os centros de retroespalhamento devem estar distribuídos de forma regular.

A lei que rege a difração de um feixe de radiação, chamada lei de Bragg, é dada por

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (3.12)$$

onde n é um número inteiro, λ o comprimento de onda do feixe, d a distância entre os planos do cristal e θ o ângulo incidente.

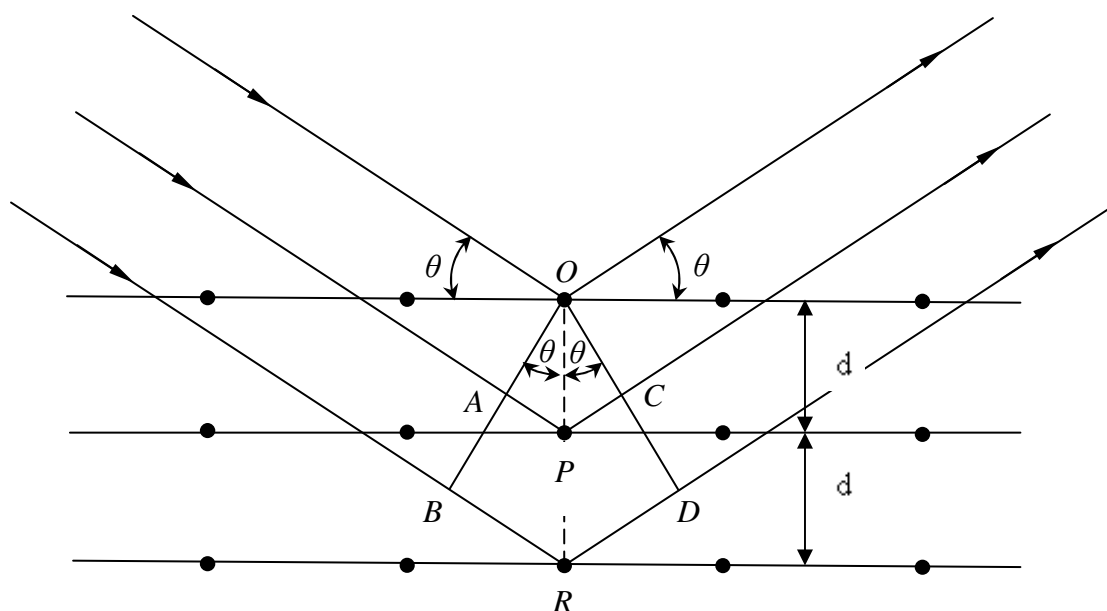


Figura 4.15 Difração de raios X em um cristal

A identificação de minerais (ou fases) pode ser efetuada com o auxílio da difração de raios X. O fato de os cristais funcionarem como redes de difração para os raios X, à semelhança das redes de difração comuns para a radiação ultravioleta e visível (espectrógrafos ópticos), faz com que eles possam ser identificados pela mencionada radiação.

Os espaços interplanares (valores de d) constituem características físicas de um mineral, a exemplo da densidade, índice de refração, ângulo ótico, ângulos de extinção, etc., de maneira que a identificação de um mineral ou mesmo de um membro de uma série isomórfica pode ser feita através de um conjunto de valores de espaços interplanares.

As amostras, com peso aproximado de 1 kg, dos agregados e pedaços de concreto de tamanho máximo de 4 cm, extraídos dos corpos de prova após a ruptura, serão secas em estufa, temperatura de 80°C, durante 1(uma) hora, e submetidas a moagem prévia (100% passante na peneira 400 mesh).

Os ensaios de difratometria de raios X serão executados em um equipamento DMAX 1100, marca Rigaku, dotado de goniômetro horizontal e monocromador de grafite. As condições analíticas são:

- condições do tubo: tensão (40 kV) e amperagem (20 mA);
- varredura: contínua;
- velocidade: 2 graus/min.

4.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura é constituído por um dispositivo que possibilita o rastreamento da superfície da amostra por um fino feixe de elétrons.

O princípio da microscopia eletrônica de varredura é fundamentado na emissão de um feixe de elétrons por um filamento de tungstênio, que concentrado, controlado e reduzido por um sistema de lentes eletromagnéticas, diafragmas e bobinas, incide sobre uma amostra provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação do feixe de elétrons e a amostra.

Neste tipo de microscópio, os elétrons são acelerados na coluna através de duas ou três lentes eletromagnéticas por tensões de 1 KV a 30 KV. Estas lentes obrigam um feixe de elétrons bastante colimado (50 Å a 200 Å de diâmetro) a atingir a superfície da amostra. Bobinas de varredura obrigam o feixe a varrer a superfície da amostra na forma de uma varredura quadrada similar a uma tela de televisão. A corrente passa pela bobina de varredura, sincronizada com as correspondentes bobinas de reflexão de um tubo de raios catódicos, produz imagem similar mas aumentada. Os elétrons emitidos atingem um

coletor e a corrente resultante é amplificada e utilizada para modular o brilho do tubo de raios catódicos. Os tempos associados com a emissão e a coleta dos elétrons, comparados com o tempo de varredura, são desprezíveis, havendo assim uma correspondência entre o elétron coletado de um ponto particular da amostra e o brilho do mesmo ponto da tela do tubo [PAU1991].

Os sinais emitidos encontram-se sob a forma de elétrons do tipo secundário, retroespalhados, absorvidos, transmitidos e difratados, e de fótons do tipo fotoluminescentes e raios X, os quais são captados por detectores apropriados, amplificados e processados num sistema analisador de cada tipo de sinal (Figura 4.16).

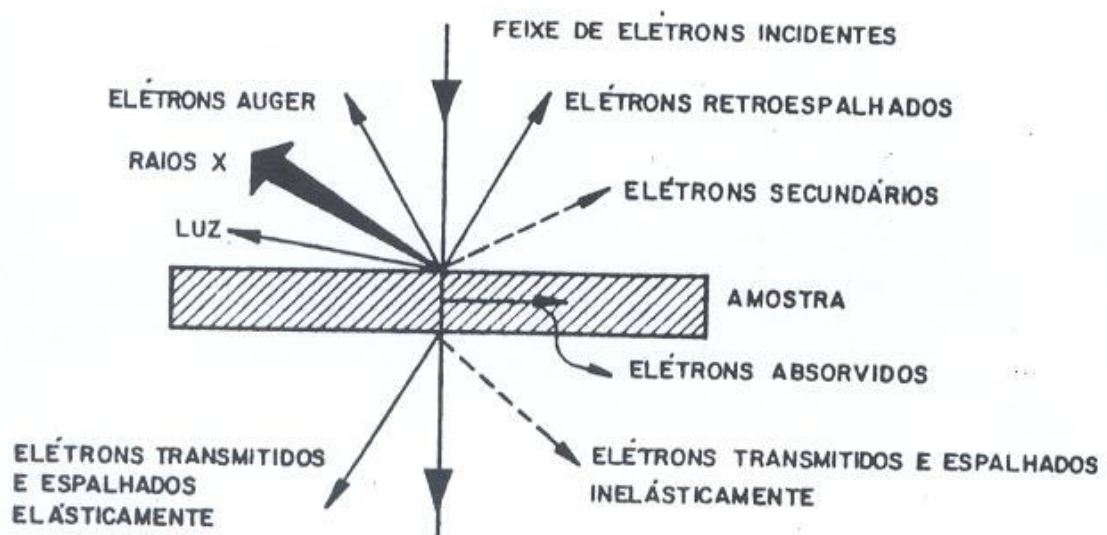


Figura 4.16 Processos de interações possíveis durante a incidência de um feixe de elétrons em uma amostra sólida

O fato dos materiais cerâmicos apresentarem baixas condutividades térmica e elétrica faz com que seja necessário revesti-los com uma fina película de metal, a fim de se evitar a geração de cargas eletrostáticas danosas à qualidade da imagem (fenômenos de descarga) e permitir a dissipação do calor produzido pelo bombardeamento eletrônico. A metalização da superfície da amostra, pela deposição de um filme de 10 nm a 20 nm de espessura, é obtida por evaporação a vácuo (0,0001 torr), à alta tensão, de metais como Al, Cu, Ni, Pt, Au etc. Muitas vezes, o C é preferível por sua baixa capacidade de

absorção de raios X, transparência na espessura empregada, facilidade de remoção, pequeno interesse nas determinações de rotina e baixo custo econômico. A preparação da amostra pode gerar muitos problemas de observação e análise, também pelo fato de que ela deve passar por um processo de secagem, que pode alterar a microestrutura [SIL 1996], apud. [RIG1998].

As argamassas e os concretos têm sido objeto de muitos estudos que utilizam a microscopia eletrônica de varredura como técnica de análise [KIH 1988] [MON 1985] [SCR 1989] [STU 1991] [DIA 1992] [JAC 1995], apud. [RIG 1998]. Nesses estudos, o analisador de raios X, por dispersão de energia (EDS), desempenha um papel fundamental, facilitando a identificação das fases hidratadas. Os aspectos mais estudados nesses materiais são [MIN 1992], apud. [RIG 1998]:

- diagnose e solução dos problemas relativos à durabilidade (ataque de agentes agressivos, corrosão de armaduras, reação álcali-agregado etc.).
- melhor entendimento do processo de hidratação e aderência pasta de cimento-agregado.
- análise do mecanismo de geração e propagação de fissuras.
- estudo da estrutura da zona de transição pasta de cimento-agregado.

As análises serão realizadas em microscópio eletrônico de varredura, sob a forma de elétrons do tipo secundários, em aparelho marca JEOL, modelo JSM 6360LV, equipado com espectômetro por energia dispersiva (EDS), marca Thermo Noran, modelo Quest.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CIMENTO PORTLAND CIMINAS CII E32

As características físicas e químicas do cimento utilizado, fabricado em novembro de 2003, lote 31011200, conforme Holcim, tabela V.1, estão de acordo com as exigências da NBR 11578-ABNT.

Tabela V.1 Características Físicas e Químicas do Cimento

ENSAIO	NBR ABNT	RESULTADO	EXIGÊNCIAS NBR 11.578
Finura peneira 200 (%)	11.579	3,7	≤ 12
Finura permeabilidade ar (Blaine) (cm ² /g)	NM.76	3768	≥ 2600
Tempos pega (min):			
Início	NM.65	205	≥ 60
Fim		315	≤ 600
Expansibilidade Le Chatelier a quente (mm)	11.582	0,10	≤ 5,0
Resistência à compressão (MPa)			
3 dias	7.215	23,5	≥ 10
7 dias		30,9	≥ 20
28 dias		37,0	≥ 32
Perda ao fogo (%)	5.743	5,45	≤ 6,5
Resíduo insolúvel (%)	5.744	1,58	≤ 2,5
Anidrido sulfúrico (SO ₃) (%)	5.745	1,75	≤ 4,0
Anidrido carbônico (CO ₂) (%)	11.583	4,24	≤ 5,0
Dióxido de silício (SiO ₂) (%)	5.742	22,17	-
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃) (%)	5.742	2,38	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) (%)	5.742	5,98	-
Óxido de cálcio (CaO) (%)	5.742	59,32	-
Óxido de magnésio (MgO) (%)	5.742	1,47	< 6,5
Óxido de sódio (Na ₂ O) (%)	5.747	0,10	-
Óxido de potássio (K ₂ O) (%)	5.747	0,74	-
Óxido de cálcio livre (CaO) (%)	7.227	2,00	-
Enxofre (S)	5.746	0,11	-

5.2 AGREGADOS

5.2.1 Descrição dos Agregados

A Tabela V.2, descreve os agregados miúdo e graúdo, utilizados nos ensaios, assim como a procedência e o local de coleta dos mesmos.

Tabela V.2 Descrição, procedência e local de coleta dos agregados

AGREGADO	PROCEDÊNCIA	LOCAL DE COLETA
Areia Quartzosa Natural	Igaratinga, MG	Centralbeton
Areia Artificial de Gnaisse	Martins Lanna	Centralbeton
Areia Artificial de Calcário	Lapa Vermelha	Concretomix
Brita n° 0 de Calcário	Contram – Borges	Supermix
Brita n.º 1 de Calcário	Contram – Borges	Supermix

As areias foram coletadas, compostas por peneiramento, conforme NBR 7214 (Areia normal para ensaios de cimento) (Tabela V.3).

Tabela V.3 Composição das areias

FRAÇÃO	GRADUAÇÃO ENTRE PENEIRAS (mm)	%
Grossa	2,4 e 1,2	25
Média Grossa	1,2 e 0,6	25
Média Fina	0,6 e 0,3	25
Fina	0,3 e 0,15	25

Os agregados graúdos, britas n°s 0 e 1 de calcário, não passaram por qualquer beneficiamento.

5.2.2 Reatividade Potencial

5.2.2.1 Introdução

Os ensaios realizados em Furnas, conforme [REL DCT.T.01.033.2004] objetivaram caracterizar os agregados quanto à sua potencialidade reativa.

5.2.2.2 Características Argamassas

- Traço unitário em massa – 1:2,25
- Relação água/cimento – 0,47

5.2.2.3 Ilustração Fotográfica dos Ensaios, conforme Figuras 5.1 a 5.4.



Figura 5.1 – Reatividade potencial dos agregados: conjunto de tanques



Figura 5.2 - Reatividade potencial dos agregados: vista interna do tanque



Figura 5.3 - Reatividade potencial dos agregados: retirada da barra

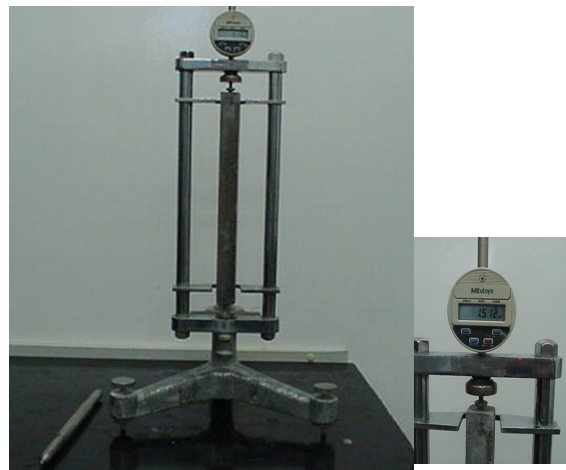


Figura 5.4 – Reatividade potencial dos agregados: leitura / relógio digital

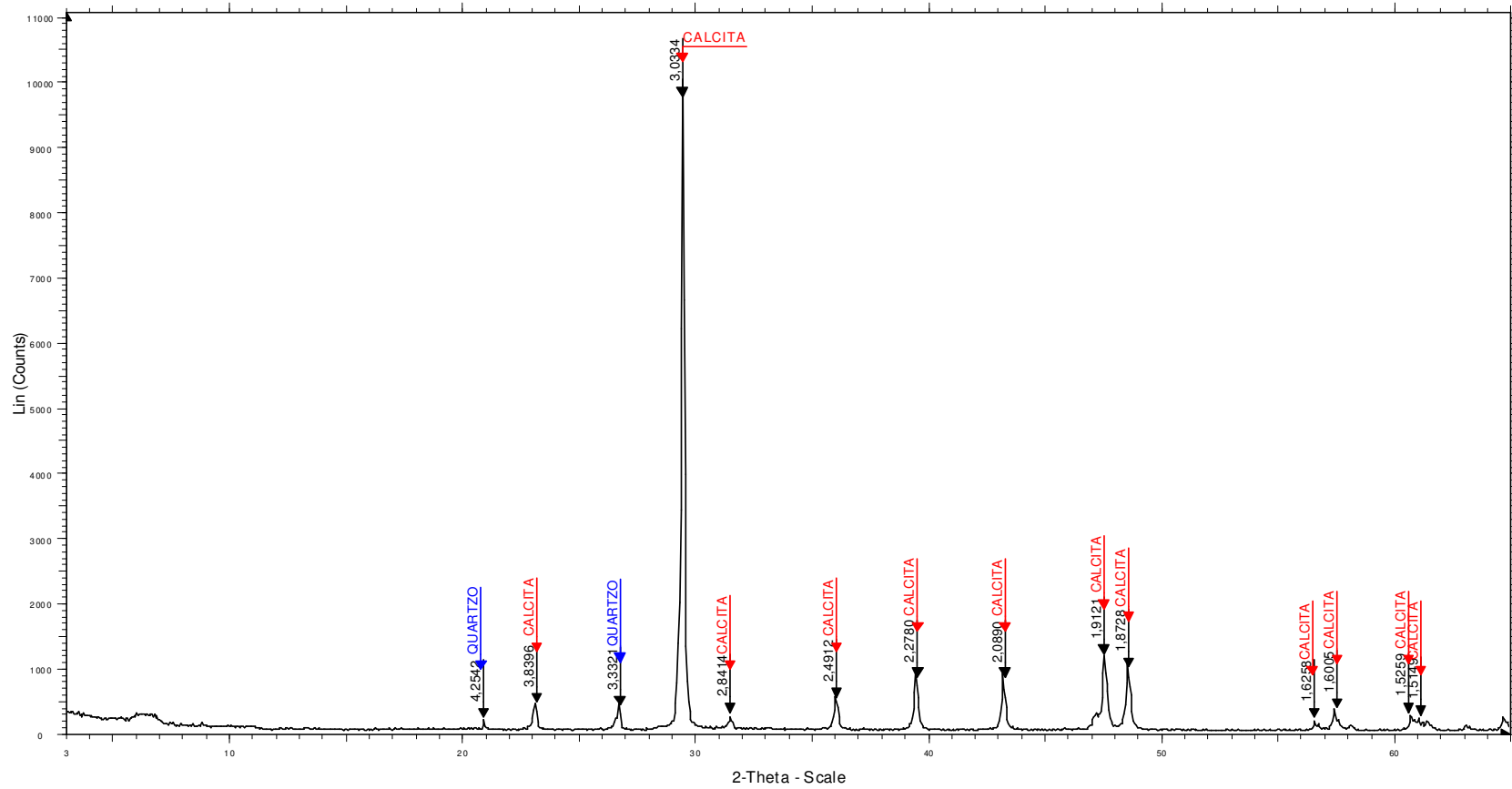
5.2.2.4 Resultados

5.2.2.4.1 Difração de raios X

5.2.2.4.1.1 Areia Artificial de Calcário – Lapa Vermelha

A análise por Difração de Raios X desta amostra possibilitou a identificação dos seguintes minerais: quartzo e calcita. O difratograma 4.1-1 (Figura 5.5) apresenta os resultados da análise com a amostra “*in natura*”.

Prog 657 - 1.0025.2004
2-Theta - Scale



Prog. 657 - Reg. 1.0025.04 (calcário) - File: 1,0025.04.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 3 s - 2-Theta: 3.00
Operations: Import

Figura 5.5. DRX: difratograma 4.1-1 - Areia de Calcário – Lapa Vermelha – Amostra Integral.

5.2.2.4.1.2 Brita N.º 0 de Calcário – Contran Borges

A análise por Difração de Raios X desta amostra possibilitou a identificação do seguinte mineral: calcita. O difratograma 4.1-2 (Figura 5.6) apresenta os resultados da análise com a amostra “*in natura*”.

Prog657 - 1.0026.2004

2-Theta - Scale

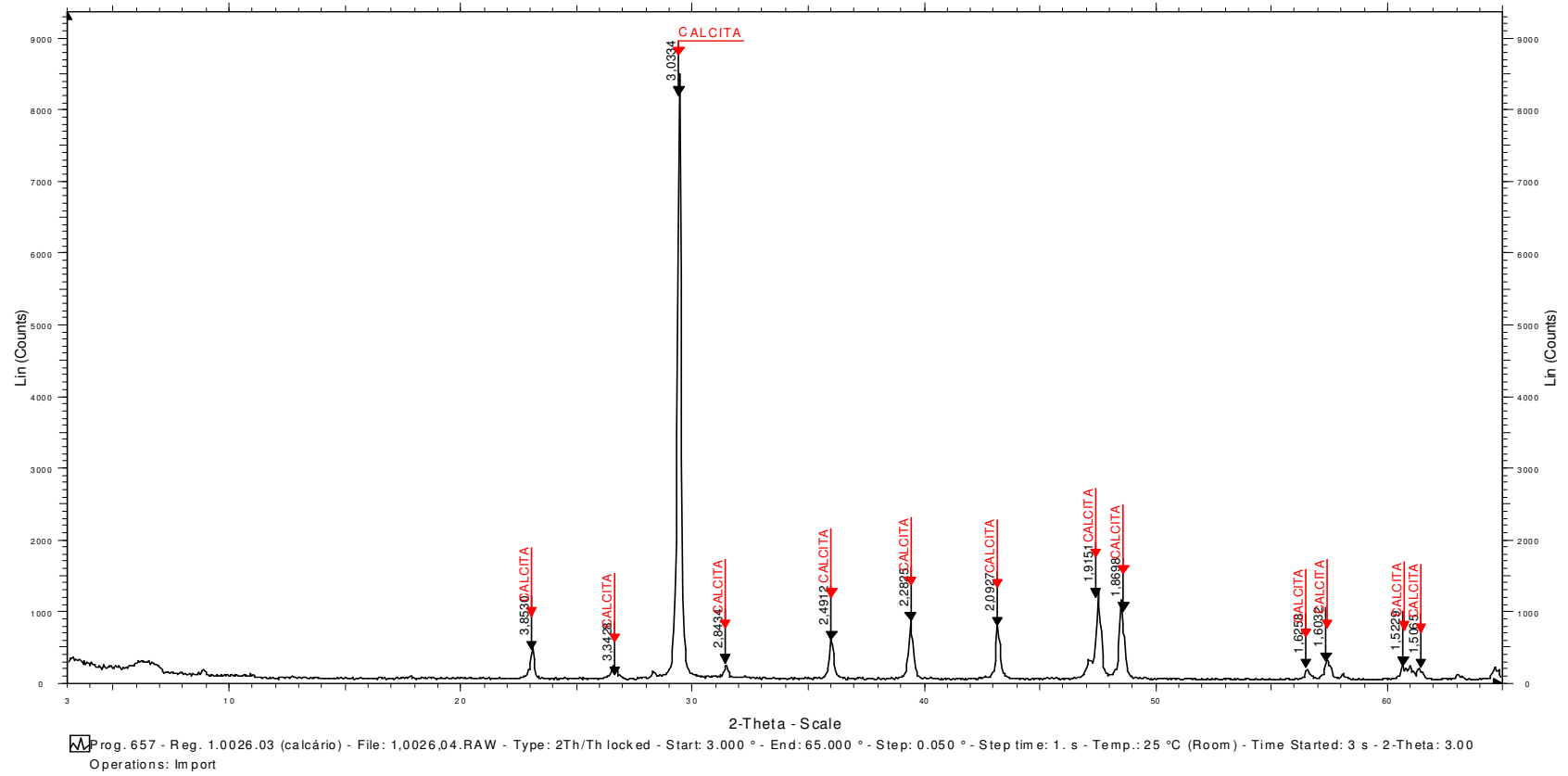


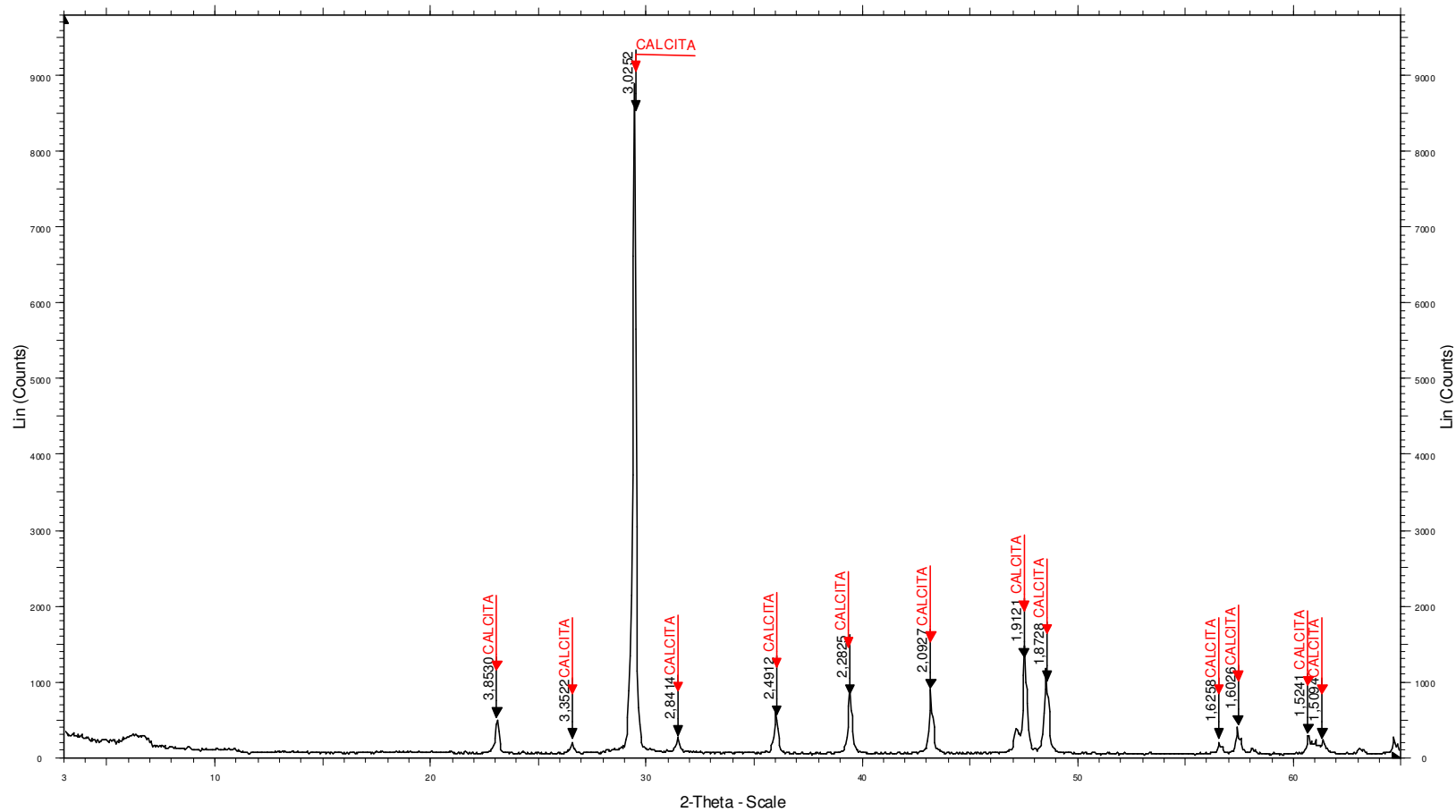
Figura 5.6. DRX: Difratoograma 4.1-2 – Brita nº 0 de Calcário – Amostra 04 “*in natura*” – Amostra Integral.

5.2.2.4.1.3 Brita N.º 1 de Calcário – Contran Borges

A análise por Difração de Raios X desta amostra possibilitou a identificação do seguinte mineral: calcita. O difratograma 4.1-3 (Figura 5.7) apresenta os resultados da análise com a amostra “in natura”.

Prog 657 - 1.0027.2004

2-Theta - Scale



Prog. 657 - Reg. 1.0027.04 (calcário) - File: 1,0027,04.RAW - Type: 2Th/Th locked - Start: 3.000 ° - End: 65.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 3 s - 2-Theta: 3.00
Operations: Import

Figura 5.7 – DRX: Difratoograma 4.1-3 – Brita nº 1 de Calcário – Amostra Integral.

5.2.2.4.2 Teor de Álcalis Totais e Solúveis do cimento

Na Tabela V.4 estão apresentados os teores de álcalis totais e solúveis em água do cimento de alto teor de álcalis, utilizado nos ensaios de reatividade.

Tabela V.4 - Álcalis Totais e Solúveis em Água

Cimento CP I-S contendo elevado teor de álcalis (1.1366.2003)	Álcalis Totais (%)			Álcalis Solúveis em Água (%)		
	Na ₂ O	K ₂ O	Equivalente Alcalino	Na ₂ O	K ₂ O	Equivalente Alcalino
	0,30	0,88	0,88	0,21	0,75	0,70

5.2.2.4.3 Reatividade Potencial Álcali-Agregado

Realizou-se ensaios, de reatividade potencial álcali-agregado, com as amostras de agregados (areia natural, areia de gnaiss, areia de calcário, brita n.º0 e brita n.º1) em combinação com cimento do tipo CP-I, com alto teor de álcalis. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Figura 5.8.

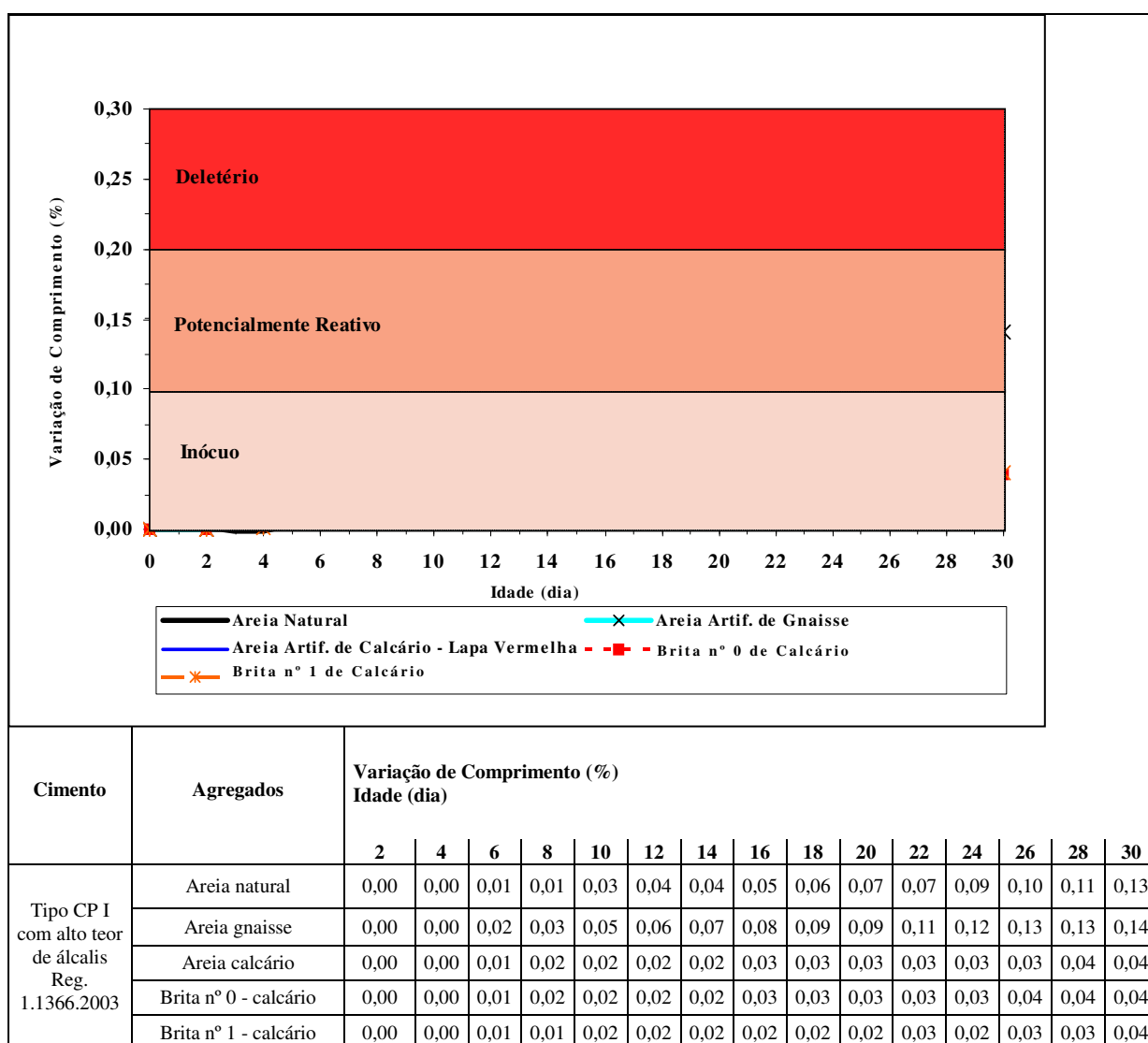


Figura 5.8 Reatividade Potencial - agregados em combinação com cimento do tipo CP I de alto teor de álcalis

5.2.2.5 Considerações

1) Em relação à norma ASTM C-1260/01, os seguintes parâmetros são apresentados para a expansão provocada pela reação álcali-agregado:

- Expansão inócua para valor menor que 0,10% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem;
- Expansão deletéria para valor maior que 0,20% aos 16 dias de ensaio, contados a partir da moldagem; e
- Valor entre 0,10% e 0,20% aos 16 dias, pode ser tanto expansão inócua quanto

deletéria, sendo, pois, necessárias informações suplementares sobre os materiais em evidência, ou ainda acompanhamento da variação de comprimento até a idade de 28 dias.

2) De forma a complementar os parâmetros supracitados, tem-se, segundo Shayan [SHA 1992], apud. [REL 033], que:

- Valor da expansão igual ou superior a 0,10% aos 10 dias indica que o agregado é reativo;
- Valor da expansão igual ou superior a 0,10% aos 22 dias indica que o agregado é lentamente reativo.

3) Os resultados obtidos, em relação à norma ASTM C - 1260/01 e aos limites apresentados por Shayan [SHA 1992], apud. [REL 033], classificam as combinações das amostras de agregados com o cimento CP I com alto teor de álcalis, da seguinte forma, Tabela V.5:

Tabela V.5 Classificação agregados - Norma ASTM C 1260/01 e limites por Shayan [SHA 1992], apud. [REL 033].

Combinação	ASTM C - 1260/01	Limites por Shayan	Natureza da Expansão
Cimento CP I com alto teor de álcalis + areia natural	Inócuo	Inócuo	Lentamente reativo (*)
Cimento CP I com alto teor de álcalis + areia gnaisse	Inócuo	Lentamente reativo	Lentamente reativo
Cimento CP I com alto teor de álcalis + areia calcário	Inócuo	Inócuo	Inócuo
Cimento CP I com alto teor de álcalis + brita 0 calcário	Inócuo	Inócuo	Inócuo
Cimento CP I com alto teor de álcalis + brita 1 calcário	Inócuo	Inócuo	Inócuo

(*) Segundo os limites apresentados pela ASTM C-1260/01 e por Shayan, a combinação de cimento CP I com alto teor álcalis e areia natural possui comportamento inócuo.

Entretanto, analisando os resultados deste ensaio até os 30 dias, a amostra caracteriza-se por um comportamento lentamente reativo.

4) A norma ASTM C-1260/01 não se aplica ao estudo de reatividade quando se deseja conhecer a potencialidade reativa de rochas contendo dolomita. Para tais casos deve-se utilizar a norma NBR 10340/88 (Agregados - Avaliação da Reatividade Potencial das Rochas Carbonáticas com os Álcalis de Cimento).

5) De acordo com os ensaios de Difração de Raios X, as amostras de calcário enviadas pelo cliente são calcíticas, sendo possível a realização dos ensaios de reatividade potencial, método acelerado - ASTM C-1260/01.

6) A realização de estudos para inibição das reações expansivas detectadas nos ensaios, é muito importante para o atendimento da durabilidade das estruturas de concreto de cimento Portland.

5.2.3 Agregados Miúdo

- Areia natural;
- Areia de gnaiss;
- Areia de calcário.

As tabelas V.6 e V.7 mostram a composição granulométrica e as características físicas dos agregados, respectivamente:

Tabela V.6 Composição granulométrica – NBR 7217

Peneiras (mm)	Porcentagens em Massa					
	Areia natural		Areia gnaisse		Areia calcário	
	Retida	Acumulada	Retida	Acumulada	Retida	Acumulada
32						
25						
19						
12,5						
9,5						
6,3						
4,8						
2,4						
1,2	24	24	23	23	23	23
0,6	27	51	27	50	28	51
0,3	26	77	26	76	25	76
0,15	21	98	21	97	19	95
Fundo	2	100	3	100	5	100
D _{máx.} (mm)	2,4		2,4		2,4	
Módulo Finura	2,50		2,46		2,45	

Tabela V.7 Características físicas

Agregado	Massa Específica Real	Massa Unitária Seca	Argila em Torrões	Material Pulverulento	Impureza Orgânicas	Absorção Água
	kg/dm ³	kg/dm ³	%	%	p.p.m.	%
Areia natural	2,60	1,46	-	0,65	< 300	0,42
Areia gnaisse	2,60	1,52	-	0,25	-	0,34
Areia calcário	2,70	1,34	-	0,76	-	0,38
Norma NBR	9776	7251	7218	7219	7220	9777

Em termos granulométricos, as areias (natural, gnaïsse e calcário) enquadram-se na Zona 3 (média), e os resultados dos ensaios estão de acordo com as exigências da NBR7211-ABNT (item 3.2.7.1).

Baseado no item 3.3.3.6.d (Determinação da forma a partir da medição da massa unitária e volume de vazios) e nos dados da Tabela V.7, pode-se, em termos comparativos, avaliar o formato dos agregados, através da determinação estimada da forma (número F), conforme Tabela V.8.

Tabela V.8 Determinação da forma dos agregados miúdo

Agregado	Massa Específica Real (A)	Massa Unitária Seca (B)	Volume Sólido (C=B/A)	Volume de Vazios D=(1-C)100	Forma (F=0,67-C)
	Kg/dm ³	Kg/dm ³	-	%	-
Areia gnaïsse	2,60	1,52	0,585	41,5	0,085
Areia natural	2,60	1,46	0,562	43,8	0,108
Areia calcário	2,70	1,34	0,496	50,4	0,174

Quanto maior o número F mais anguloso é o agregado. Em geral este número está compreendido entre 0 e 0,12 para um agregado monogranular e compactado para o cálculo da massa unitária.

Em termos comparativos, pela ordem, as areias com formato mais equidimensional são: areia de gnaïsse, areia artificial e areia de calcário.

5.2.4 Agregados Graúdo

- Brita nº 0
- Brita nº 1

As tabelas V.9 e V.10 mostram a composição granulométrica e as características físicas dos agregados, respectivamente:

Tabela V.9 Composição granulométrica – NBR 7217

Peneiras (mm)	Porcentagens em Massa			
	Brita n.º 0		Brita n.º 1	
	Retida	Acumulada	Retida	Acumulada
32				
25				
19			9	9
12,5			72	81
9,5	8	8	14	95
6,3	54	62	4	99
4,8	20	82	0	99
2,4	13	95	0	99
1,2	2	97	0	99
0,6	1	98	0	99
0,3	0	98	0	99
0,15	0	98	0	99
Fundo	2	100	1	100
D _{máx.} (mm)	12,5		25	
Módulo Finura	5,76		6,98	

Tabela V.10 Características físicas

Agregado	Massa Específica Real	Massa Unitária Seca	Argila em Torrões	Material Pulverulento	Forma Grãos	Absorção Água
	kg/dm ³	kg/dm ³	%	%	-	%
Brita n.º 0	2,70	1,43	-	1,2	-	0,91
Brita n.º 1	2,73	1,41	-	0,3	1,5	0,24
Norma NBR	9937	7251	7218	7219	7809	9937

Os resultados dos ensaios estão de acordo com as exigências da NBR 7211-ABNT (item 3.2.7.2), exceto quanto ao teor de material pulverulento da brita nº 0 (máximo 1,0%), sendo que a brita nº 0 atende a graduação 0 e a brita nº 1 atende a graduação 1.

5.3 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS DOS CONCRETOS

Os concretos, num total de 11 (onze) traços, tiveram como características constantes os parâmetros da Tabela V.11 e como variáveis, conforme Tabela V.12, o tipo e a proporção das areias.

Tabela V.11 Parâmetros Constantes dos Traços

Consumo cimento, kg/m ³	350
Consumo água, kg/m ³	190
Relação água / cimento	0,543
Teor argamassa (%)	45,30
Consistência (Slump) (mm)	(70 ± 10)
Porcentagem de agregado miúdo em relação ao agregado total (%)	35

Tabela V.12 Características misturas dos concretos

Mistura	Notação	Composição areias (%)			Traço unitário em massa
		natural	gnaisse	calcário	
A	100N	100	-	-	1:1,858:0,863:2,588
B	80N + 20G	80	20	-	1:1,486:0,372:0,863:2,588
C	60N + 40G	60	40	-	1:1,115:0,743:0,863:2,588
D	40N + 60G	40	60	-	1:0,743:1,115:0,863:2,588
E	20N + 80G	20	80	-	1:0,372:1,486:0,863:2,588
F	100G	-	100	-	1:1,858:0,863:2,588
G	80N + 20C	80	-	20	1:1,490:0,373:0,865:2,595
H	60N + 40C	60	-	40	1:1,120:0,747:0,867:2,601
I	40N + 60C	40	-	60	1:0,749:1,123:0,869:2,608
K	20N + 80C	20	-	80	1:0,375:1,502:0,872:2,615
L	100C	-	-	100	1:1,882:0,874:2,622

A composição granulométrica da mistura cimento e agregados, exemplificando o concreto A (100N), aproximou-se muito da curva granulométrica de Bolomey, para $D_{\text{máx}} = 19$ mm, conforme Tabela V.13 e gráfico mostrado na Figura 5.9.

Considerando o tipo e classe do cimento Portland utilizado (CPII E 32), a relação $a/c=0,543$ ($a=190$ kg, $c=350$ kg), concluiu-se que a composição dos materiais componentes (cimento + areias + brita nº0 + brita nº1) próxima da composição ideal de Bolomey, contribuiu significativamente para a obtenção dos resultados.

Alterações na classe do cimento (CPII E 40, por exemplo), redução da relação a/c , com a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes, aumentaria substancialmente a resistência mecânica dos concretos estudados.

Tabela V.13 Composição granulométrica da mistura cimento e agregados, concreto A (100N), e composição ideal segundo Bolomey [PET 1978].

Peneiras (d) mm	Porcentagem em massa acumulada – Mistura A				Bolomey $90 - 90 \sqrt{\frac{d}{D_{\text{máx}}}}$
	Cimento (18,85%)	Areia (29,45%)	Britas (54,70%)	Total (100%)	
25					
19			3,56	3,56	0
12,5			32,04	32,04	17,0
9,5			38,64	38,64	26,4
6,3			47,34	47,34	38,2
4,8			49,98	49,98	44,8
2,4			51,69	51,69	58,0
1,2		6,82	51,96	58,78	67,4
0,6		14,48	52,09	66,57	74,0
0,3		21,87	52,09	73,96	78,7
0,15		27,83	52,09	79,92	82,0
Fundo	18,85	28,40	52,75	100	100,0
D _{máx}				19	19
MF				4,23	4,32

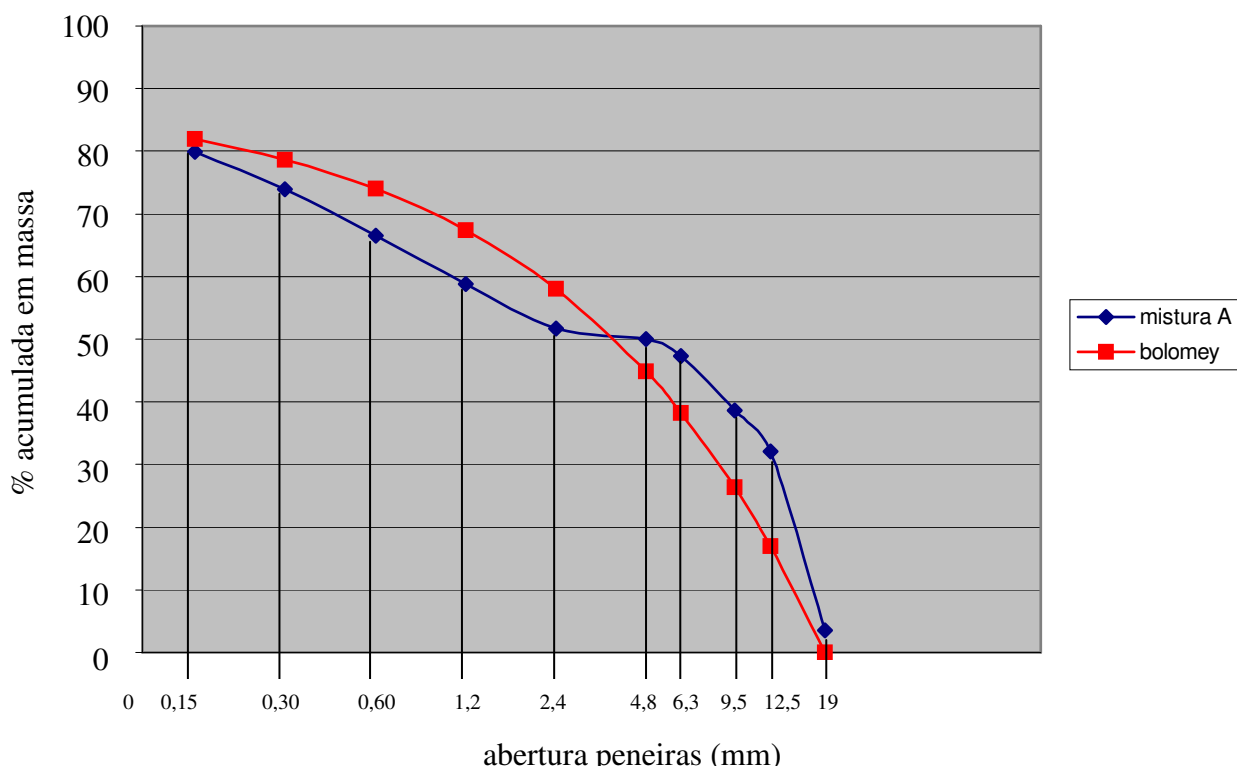


Figura 5.9 Gráfico: Composição granulométrica concreto A (100N) x curva granulométrica de Bolomey ($D_{máx}=19\text{mm}$)

5.4 QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA MOLDADOS E RELAÇÃO DE ENSAIOS

Cada mistura de concreto, das 11 (onze) estudadas, teve os corpos de prova, total de 36 (trinta e seis), moldados de concretos de uma única amassada, betoneira de 320 litros, conforme Tabela V.14.

Tabela V.14 Relação de corpos de prova moldados e ensaios

CP	Idade (dias)	Dimensão CP (mm)	Ensaio(s)
1	3	100x200	Compressão
2	3	100x200	Compressão
3	3	100x200	Compressão
4	3	100x200	Compressão
5	7	100x200	Compressão
6	7	100x200	Compressão
7	7	100x200	Compressão
8	7	100x200	Compressão
9	28	100x200	Compressão
10	28	100x200	Compressão
11	28	100x200	Compressão
12	28	100x200	Compressão
13	7	150x300	Tração simples
14	7	150x300	Tração simples
15	7	150x300	Tração simples
16	7	150x300	Tração simples
17	28	150x300	Módulo elasticidade dinâmico e tração simples
18	28	150x300	Módulo elasticidade dinâmico e tração simples
19	28	150x300	Módulo elasticidade dinâmico e tração simples
20	28	150x300	Módulo elasticidade dinâmico e tração simples
21	7	150x300	Módulo de elasticidade estático
22	7	150x300	Módulo de elasticidade estático
23	7	150x300	Módulo de elasticidade estático
24	7	150x300	Módulo de elasticidade estático
25	28	150x300	Módulo de elasticidade estático
26	28	150x300	Módulo de elasticidade estático
27	28	150x300	Módulo de elasticidade estático
28	28	150x300	Módulo de elasticidade estático
29	7	150x150x500	Tração na flexão
30	7	150x150x500	Tração na flexão
31	7	150x150x500	Tração na flexão
32	7	150x150x500	Tração na flexão
33	28	150x150x500	Tração na flexão
34	28	150x150x500	Tração na flexão
35	28	150x150x500	Tração na flexão
36	28	150x150x500	Tração na flexão

5.5 LABORATÓRIOS PARTICIPANTES DA PESQUISA

Na Tabela V.15 estão relacionados os laboratórios participantes da pesquisa; são laboratórios de universidades, faculdades, estatais e privados.

Tabela V.15 Relação laboratórios participantes da pesquisa

Ensaio / Serviços	Laboratório
Beneficiamento (peneiramento) areias	Consultare
Caracterização Cimento Portland	Holcim
Caracterização areias (natural, gnaisse e calcário)	Consultare
Caracterização britas n.º 0 e 1 de calcário	Consultare
Reatividade potencial agregados	Furnas
Forma agregados	Consultare
Moldagem e cura corpos de prova de concreto	Supermix
Compressão	Supermix
Tração na flexão	FEA FUMEC
Tração simples (compressão diametral)	FEA FUMEC
Módulo elasticidade estático	EE UFMG
Módulo elasticidade dinâmico	EE UFMG
Difração raios X (DRX)	ABCP, FURNAS
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	EE UFMG

5.6 RESULTADOS ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

5.6.1 Consistência (slump), teor de ar incorporado (AI) e densidade

A Tabela V.16 mostra os resultados obtidos, satisfatórios para as características dos concretos analisados, as quais poderiam ser melhoradas com a utilização de aditivos químicos adequados.

Tabela V.16 Resultados de consistência (slump) inicial, após mistura (15 min e 30 min); AI (ar incorporado) e densidade.

Mistura	Notação	Consistência (slump) - mm			AI %	Densidade kg/m ³
		Inicial, após mistura	15 min, após mistura	30 min, após mistura		
A	100N	70	60	50		
B	80N + 20G	75	65	45		
C	60N + 40G	75	70	60		
D	40N + 60G	75	65	60		
E	20N + 80G	65	50	40		
F	100G	80	65	50		
G	80N + 20C	75	55	35		
H	60N + 40C	75	45	35	0,7	2419
I	40N + 60C	70	55	45		
K	20N + 80C	75	60	55		
L	100C	75	60	50		

Concretos com boa trabalhabilidade: coesos (sem segregação), boa textura (facilidade no acabamento), grande poder de retenção de água (oposto de exsudação) e manutenção satisfatória da consistência (slump).

Apesar do baixo teor de argamassa (45,3% para lançamento convencional), com a utilização de aditivos químicos plastificantes, adequados, o bombeamento dos concretos (mistura A a L) é possível, com melhorias nas propriedades do concreto endurecido, principalmente módulo de elasticidade e resistência á tração.

5.6.2 Compressão, tração e módulo de elasticidade

As Tabelas V.17 a V.20 mostram os resultados obtidos: compressão, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade (dinâmico e estático).

Calculou-se o desvio relativo máximo da série de quatro resultados, dividindo o valor absoluto da diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste desta média, para mais ou para menos, pela resistência média e multiplicando este quociente por 100.

Quando o desvio relativo máximo superou o valor de 6%, calculou-se uma nova média, desconsiderando o valor discrepante, identificando-o com um (*), conforme NBR7215-ABNT.

Tabela V.17 Resultados Ensaio Resistência à Compressão

CP	Idade	Mistura										
		A (100N)	B (80N+20G)	C (60N+40G)	D (40N+60G)	E (20N+80G)	F (100G)	G (80N+20C)	H (60N+40C)	I (40N+60C)	K (20N+80C)	L (100C)
1	3	17,8	18,1	17,6	18,0	16,5	14,6	15,9	16,2	16,6	18,5	16,6
2	3	18,4	17,9	17,3	17,3	17,3	15,9	15,9	16,6	16,6	18,2	17,8
3	3	20,7*	16,7	18,1	16,9	17,7	15,9	16,6	14,6*	17,8	18,5	16,6
4	3	19,0	16,4	16,8	16,3	16,3	15,3	16,6	16,2	17,8	18,5	17,2
Média		18,4	17,3	17,5	17,1	17,0	15,4	16,3	16,3	17,2	18,4	17,1
5	7	24,8	25,6	25,0	26,6	27,1	23,3	25,6	26,2	26,7	25,4	26,1
6	7	24,6	25,8	24,7	25,0	24,6	25,2	27,8	25,2	26,7	26,1	24,8
7	7	25,5	25,7	26,9	25,6	26,9	24,8	26,8	29,2*	25,9	25,2	26,1
8	7	24,8	25,7	26,4	26,3	25,7	25,2	23,6*	24,9	25,5	25,9	25,1
Média		24,9	25,7	25,8	25,9	26,1	24,6	26,7	25,4	26,2	25,7	25,5
9	28	33,7	33,3	34,0	36,1	35,7	34,6	36,9	37,3	35,8	36,7	34,9
10	28	34,4	35,4	33,5	36,2	36,2	35,0	33,7	34,4	34,2	34,4	37,0
11	28	35,6	33,3	36,0	34,5	34,2	37,0	33,3	31,3*	37,3	35,0	36,7
12	28	34,1	36,1	35,0	34,4	35,9	36,6	37,2	35,9	35,5	35,4	34,4
Média		34,5	34,5	34,6	35,3	35,5	35,8	35,3	35,9	35,7	35,4	35,8

Tabela V.18 Resultados ensaios resistência à tração por compressão diametral (f_{tD}) - MPa

CP	Idade	Mistura										
Nº.	(dias)	A (100N)	B (80N+20G)	C (60N+40G)	D (40N+60G)	E (20N+80G)	F (100G)	G (80N+20C)	H (60N+40C)	I (40N+60C)	K (20N+80C)	L (100C)
13	7	2,2	2,4*	2,5	2,2*	2,5	3,0	2,6	2,7	2,6	2,7	3,0
14	7	2,2	2,1	2,3	2,5	2,4	3,0	2,6	2,6	2,3*	2,6	3,0
15	7	2,0	2,3	2,3	2,4	2,6	2,8	2,8	2,8	2,6	2,5	2,9
16	7	2,3	2,1	2,5	2,3	2,3*	2,8	2,4*	2,6	2,8	2,5	2,8
Média		2,2	2,2	2,4	2,4	2,5	2,9	2,7	2,7	2,7	2,6	2,9
17	28	3,4	3,5	3,9	3,5	3,9	3,9	3,6	3,9	3,7	3,9	3,8
18	28	3,5	3,3	3,7	3,7	3,9	3,9	3,5	4,0	3,8	4,1	3,9
19	28	3,6	3,7	3,5	3,5	4,0	3,5*	3,3	3,6	3,8	4,0	3,9
20	28	3,5	3,5	3,6	3,9	3,8	4,1	3,9*	3,5	3,6	3,8	4,1
Média		3,5	3,5	3,7	3,7	3,9	4,0	3,5	3,8	3,7	4,0	3,9

Tabela V.19 Resultados ensaios resistência à tração na flexão (f_{ctM}) - MPa

CP	Idade	Mistura										
Nº.	(dias)	A (100N)	B (80N+20G)	C (60N+40G)	D (40N+60G)	E (20N+80G)	F (100G)	G (80N+20C)	H (60N+40C)	I (40N+60C)	K (20N+80C)	L (100C)
29	7	3,6	3,5	3,6	3,2*	3,9	4,4	3,6	3,3*	3,5	4,1	4,0
30	7	3,6	3,5	3,5	3,2	4,2	4,4	3,5	3,8	3,4	4,0	4,2
31	7	3,7	3,9*	3,4	3,1	3,8	4,6	3,8	3,8	3,8	3,9	3,8
32	7	3,7	3,6	3,4	3,2	4,4*	4,9*	3,7	3,8	3,8	4,2	4,1
Média		3,6	3,5	3,5	3,2	4,0	4,4	3,7	3,8	3,6	4,1	4,0
33	28	4,8	4,7	5,0	5,3	5,7	5,8	5,4	5,2*	5,8	6,2	6,3
34	28	5,1	5,3	5,2	5,3	5,9	5,4*	5,3	5,5	5,8	6,1	5,7
35	28	5,1	4,9	5,3	5,2	5,4	5,8	5,0*	5,6	5,7	5,8	6,2
36	28	5,3	5,2	5,2	5,2	5,6	6,0	5,5	5,7	6,0	6,2	5,8
Média		5,1	5,0	5,2	5,3	5,7	5,9	5,4	5,6	5,8	6,1	6,0

Tabela V.20 Resultados Ensaio Módulo Elasticidade

CP N°.	Idade (dias)	A (100N)	B (80N+20G)	C (60N+40G)	D (40N+60G)	E (20N+80G)	F (100G)	G (80N+20C)	H (60N+40C)	I (40N+60C)	K (20N+80C)	L (100C)
Módulo de Elasticidade Dinâmico (Ed) – GPa												
17	28	24	24	26	25*	27	27	28	27	27	26	27
18	28	28*	25	26	28	28	28	28	28	29	27	29
19	28	26	26	24	27	24*	28	26	26	28	28	28
20	28	24	16*	29*	27	28	28	27	27	27	26	27
Média		25	25	25	27	28	28	27	27	28	27	28
Módulo de Elasticidade Estático (E) – GPa												
21	7	19,1	22,2	22,3	26,9*	23,5	23,1	23,9	24,1	25,3	23,1	23,7
22	7	20,0	22,1	21,8	24,3	24,6	21,0*	22,2	22,5	22,5*	22,6	23,5
23	7	21,0	24,2*	24,9*	23,4	25,3	24,2	22,6	23,2	25,2	23,1	21,6
24	7	25,9*	22,5	22,7	25,1	25,5	25,0	21,9	24,4	24,3	23,5	18,8*
Média		20,0	22,3	22,3	24,3	24,7	24,1	22,7	23,6	24,9	23,1	22,9
25	28	25,2	25,1	26,6	26,8	26,0	25,7	26,9	26,2	27,9	25,8	26,4
26	28	25,4	27,7*	26,6	25,9	26,5	26,7	27,1	26,1	25,5	26,9	26,3
27	28	25,2	24,6	26,6	27,7	29,4*	28,4	27,1	26,4	24,8*	27,8	28,3
28	28	24,8	24,5	24,2*	25,5	28,4	27,4	27,3	32,4*	25,5	28,1	24,5*
Média		25,1	24,7	26,6	26,5	27,0	27,1	27,1	26,2	26,3	27,1	27,0

A Figura 5.10 mostra a superfície de fratura de corpos de prova prismáticos (ensaios de tração na flexão); a fratura, na maioria dos casos, passa através de partículas do agregado graúdo, de rocha calcária, e não na zona de transição, indicando uma excelente aderência entre a pasta de cimento e o agregado.

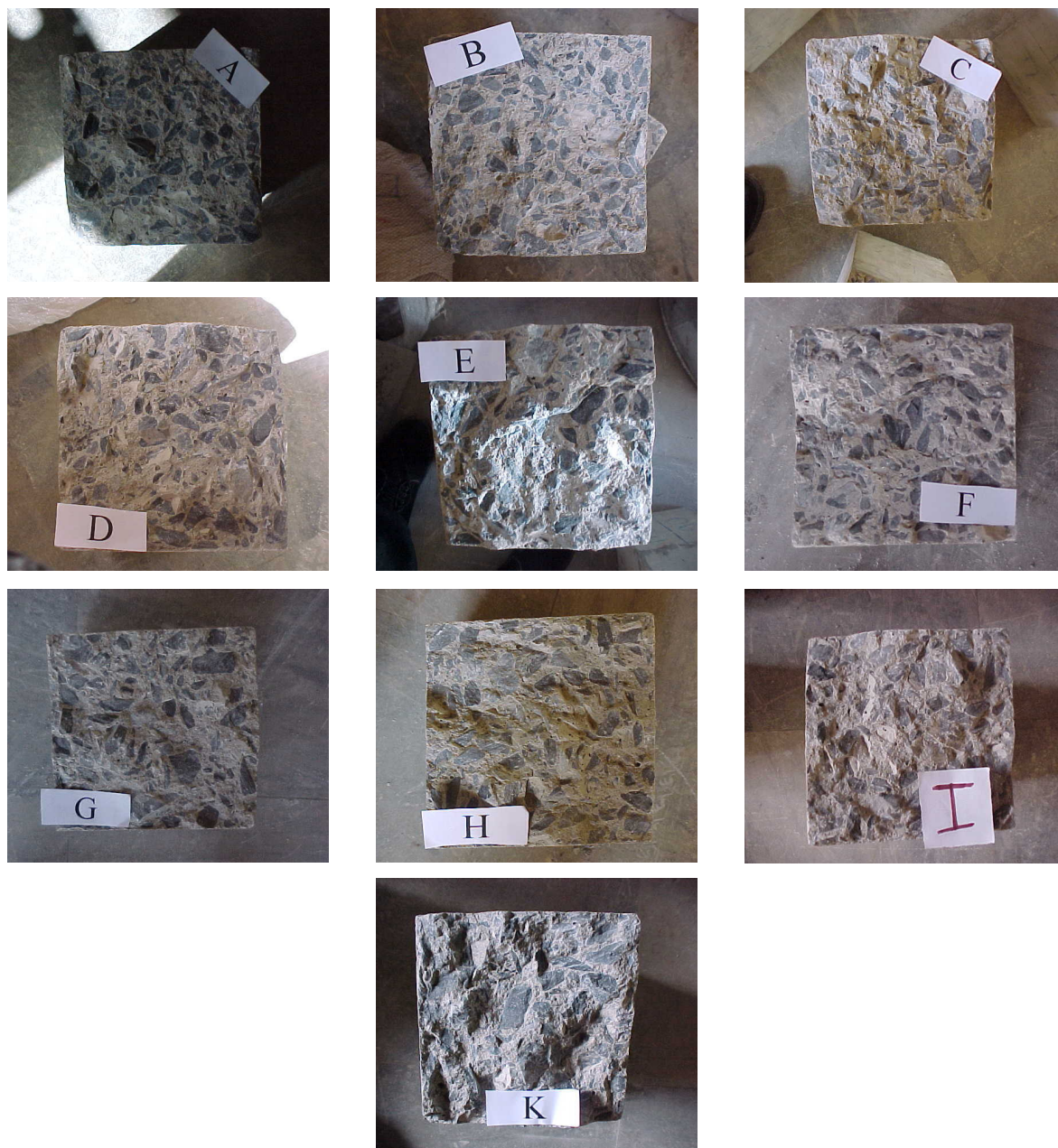


Figura 5.10 Superfície de fratura de corpos de prova prismáticos.

As Figuras 5.11 a 5.15 mostram a representação gráfica dos resultados médios obtidos:

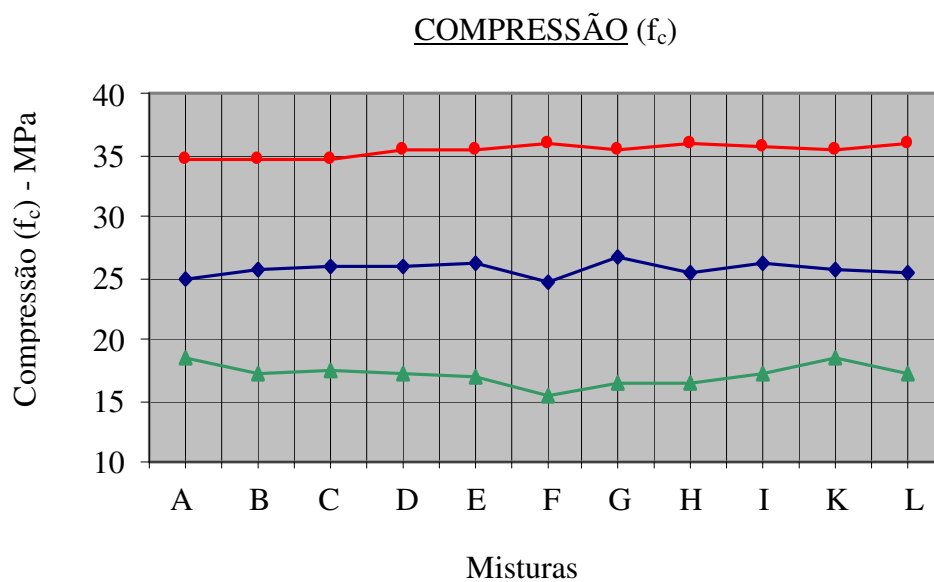


Figura 5.11. Compressão (f_c): gráfico, resultados médios nas idades de 3 dias (\blacktriangle), 7 dias (\blacklozenge) e 28 dias (\bullet).

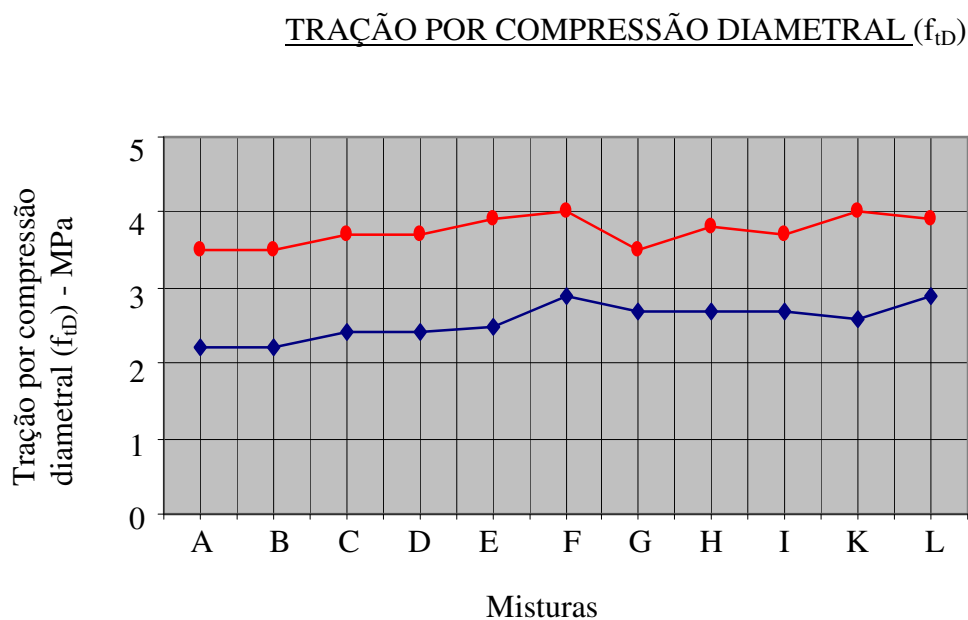


Figura 5.12. Tração por compressão diametral (f_{tD}): gráfico, resultados médios nas idades de 7 dias (\blacklozenge) e 28 dias (\bullet).

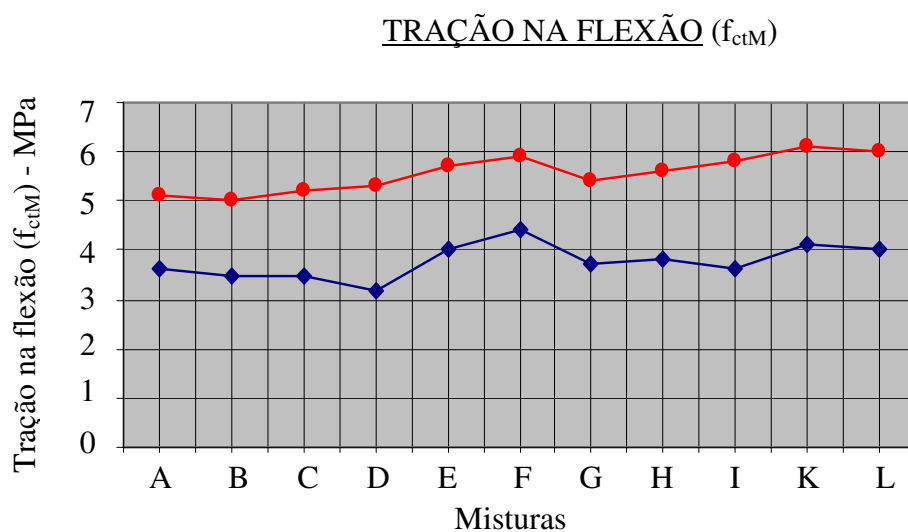


Figura 5.13. Tração na flexão (f_{ctM}): gráfico, resultados médios nas idades de 7 dias (—◆—) e 28 dias (—●—).

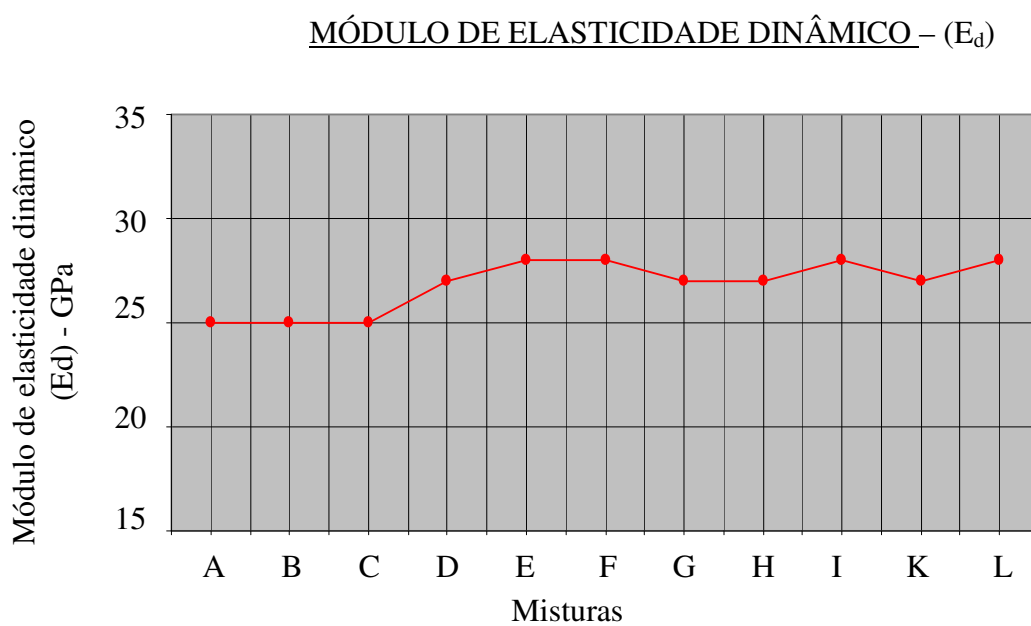


Figura 5.14 Módulo de elasticidade dinâmico (E_d): gráfico, resultados médios na idade de 28 dias (—●—).

MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (E)

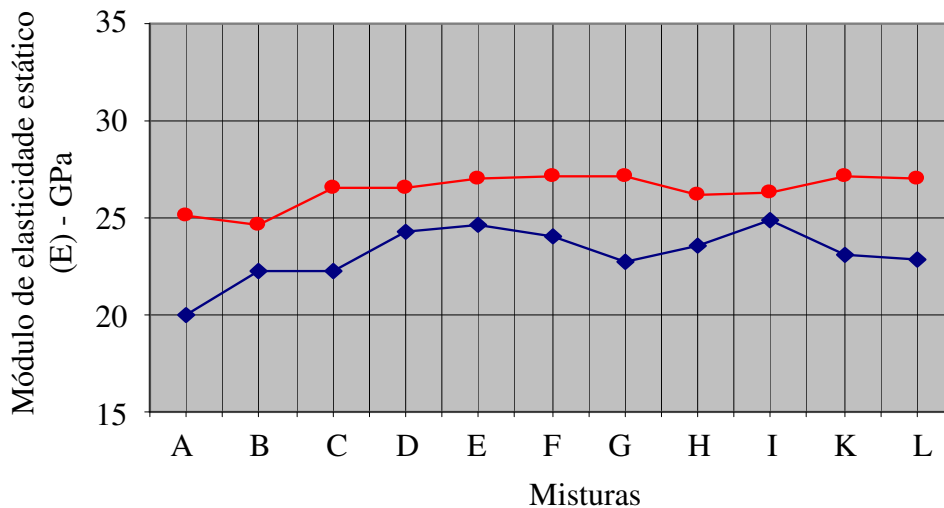


Figura 5.15 Módulo elasticidade estático (E): gráfico, resultados médios nas idades de 7 dias (—◆—) e 28 dias (—●—).

A Tabela V.21 mostra a variação dos resultados médios obtidos, na idade de 28 dias, em relação à mistura A (100N), como referência, em termos percentuais.

As variações máximas, em relação ao concreto da mistura A (100N), foram as seguintes:

- Resistência à compressão (f_c):
 - acréscimo de 4,1%, mistura H (60N + 40C)
- Resistência à tração por compressão diametral (f_{tD}):
 - acréscimo de 14,3%, misturas F (100G) e K (20N + 80C)
- Resistência à tração na flexão (f_{ctM}):
 - acréscimo de 19,6%, mistura K (20N + 80C)
- Módulo elasticidade dinâmico (E_d):
 - acréscimo de 12,0%, misturas E (20N+80G), F (100G), I (40N+60C) e L (100C)

- Módulo de elasticidade estático (E):
 - acréscimo de 8,0%, misturas F (100G), G (80N + 20C) e K (20N + 80C)

Tabela V.21 Resultados médios obtidos, idade 28 dias, ensaios de compressão, tração e módulo de elasticidade; variação (%) de resultados em relação à mistura A (100N)

Mistura	Compressão (fc)		Tração por compressão diametral (f _{tD})		Tração na flexão (f _{ctM})		Módulo dinâmico (Ed)		Módulo estático (E)	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	GPa	%	GPa	%
A (100N)	34,5	100,0	3,5	100,0	5,1	100,0	25	100,0	25,1	100,0
B (80N+20G)	34,5	100,0	3,5	100,0	5,0	98,0	25	100,0	24,7	98,4
C (60N+40G)	34,6	100,3	3,7	105,7	5,2	102,0	25	100,0	26,6	106,0
D (40N+60G)	35,3	102,3	3,7	105,7	5,3	103,9	27	108,0	26,5	105,6
E (20N+80G)	35,5	102,9	3,9	111,4	5,7	111,8	28	112,0	27,0	107,6
F (100G)	35,8	103,8	4,0	114,3	5,9	115,7	28	112,0	27,0	108,0
G (80N+20C)	35,3	102,3	3,5	100,0	5,4	105,9	27	108,0	27,1	108,0
H (60N+40C)	35,9	104,1	3,8	108,6	5,6	109,8	27	108,0	26,2	104,4
I (40N+60C)	35,7	103,5	3,7	105,7	5,8	113,7	28	112,0	26,3	104,8
K (20N+80C)	35,4	102,6	4,0	114,3	6,1	119,6	27	108,0	27,1	108,0
L (100C)	35,8	103,8	3,9	111,4	6,0	117,6	28	112,0	27,0	107,6

A Tabela V.22 mostra as correlações entre os resultados dos ensaios, na idade de 28 dias, e as comparações entre os resultados obtidos e os estimados pelo ACI: American Concrete Institute, com as seguintes considerações:

a) Resistência à tração por compressão diametral (f_{tD}):

- $f_{tD} = k \times f_c$, com k variando entre 0,10 e 0,11

Elia Alonso [ELI 2002] obteve a seguinte correlação:

- $f_{tD} = 0,10 \times f_c$

b) Resistência à tração na flexão (f_{ctM}):

- $f_{ctM} = k \times f_c$, com k variando entre 0,14 e 0,17

Elia Alonso [ELI 2002] obteve a seguinte correlação:

- $f_{ctM} = 0,12 \times f_c$

c) Módulo de elasticidade: E (estático) x E_d (dinâmico):

- $E = k \times E_d$, com k variando entre 0,94 e 1,06, com média de 1,00, ou seja, resultados praticamente idênticos

d) Estimativa do módulo de elasticidade estático (E), segundo ACI.318 [CET 1998]:

- $E = 4730 (f_c)^{0,5}$, MPa
- Resultados dos concretos com areia artificial (misturas E, F, G, K, L), próximos (variação de 4%) dos estimados pelo ACI.

e) Estimativa da resistência à tração na flexão (f_{ctM}), segundo ACI.318 e ACI.363 [CET 1998]:

- $f_{ctM} = 620 \times (f_c)^{0,5}$, MPa – ACI 318 ($f_c < 41,3$ MPa)
- $f_{ctM} = 970 \times (f_c)^{0,5}$, MPa – ACI 363 ($41,3 \text{ MPa} \leq f_c \leq 82,7$ MPa)
- resultados, dos concretos com areia artificial (misturas E, F, I, K, L), iguais ou superiores às estimativas do ACI.363, para concretos de alta resistência.

Analisando os resultados do trabalho, na idade de 28 dias, com os resultados de outras fontes citadas na referência bibliográfica (item 3.7), têm-se os seguintes dados comparativos:

a) H. Donza [DON 2002]

a.1) Tração por compressão diametral (f_{tD})

- Resultados dos concretos com areia artificial (misturas E, F, H, K e L), ($\geq 3,8$ MPa e $\leq 4,0$ MPa), próximos aos obtidos por Donza: mistura SG-485 (areia de granito, cimento = 485 kg/m^3), $f_{ID} = 3,84$ MPa e mistura SL-485 (areia de calcário, cimento = 485 kg/m^3), $f_{ID} = 3,90$ MPa.

b) Pavimento de Concreto para Aeroporto [REL 1983]

b.1) Características do Concreto:

- Cimento CP 320;
- Areia natural (50%);
- Areia de calcário (50%);
- Consumo cimento: 350 kg/m^3 .

b.2) Resistência à compressão (f_c)

- Resultados (misturas A a L) superiores aos 31,6 MPa obtidos.

b.3) Resistência à tração na flexão (f_{ctM})

- Resultados (misturas F, K e L), ($\geq 5,9$ MPa e $\leq 6,1$ MPa), próximos aos 6,35 MPa obtidos.

Tabela V.22 Correlações entre resultados de ensaios de compressão, tração e módulo elasticidade, idade de 28 dias e estimativas ACI.

Mistura	Resultados Médios Obtidos					Correlações			Estimativas		
	f _c MPa	f _{iD} MPa	f _{ctM} MPa	E GPa	Ed GPa	$\frac{f_{iD}}{f_c}$	$\frac{f_{ctM}}{f_c}$	$\frac{E}{Ed}$	ACI.318	ACI.318	ACI.363
									E GPa	f _{ctM} MPa	f _{ctM} MPa
A (100N)	34,5	3,5	5,1	25,1	25	0,10	0,15	1,00	27,8	3,6	5,7
B (80N+20G)	34,5	3,5	5,0	24,7	25	0,10	0,14	0,99	27,8	3,6	5,7
C(60N+40G)	34,6	3,7	5,2	26,6	25	0,11	0,15	1,06	27,8	3,6	5,7
D(40N+60G)	35,3	3,7	5,3	26,5	27	0,10	0,15	0,98	28,1	3,7	5,8
E(20N+80G)	35,5	3,9	5,7	27,0	28	0,11	0,16	0,96	28,2	3,7	5,8
F(100G)	35,8	4,0	5,9	27,1	28	0,11	0,16	0,97	28,3	3,7	5,8
G(80N+20C)	35,3	3,5	5,4	27,1	27	0,10	0,15	1,00	28,1	3,7	5,8
H(60N+40C)	35,9	3,8	5,6	26,2	27	0,11	0,16	0,97	28,3	3,7	5,8
I(40N+60C)	35,7	3,7	5,8	26,3	28	0,10	0,16	0,94	28,3	3,7	5,8
K(20N+80C)	35,4	4,0	6,1	27,1	27	0,11	0,17	1,00	28,1	3,7	5,8
L(100C)	35,8	3,9	6,0	27,0	28	0,11	0,17	0,96	28,3	3,7	5,8

5.7 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

As propriedades das pedras resultam das propriedades dos minerais constituintes. Esta relação, no entanto, não é absoluta, dependendo ainda da estrutura da pedra, resultante da formação geológica: vulcânica, sedimentar, metamórfica; da textura da pedra, ou seja, do arranjo, forma e dimensões dos elementos e, finalmente, do estado de alteração dos mesmos [PET 1978].

Conforme os ensaios de Difração de Raios X (DRX), a composição mineralógica dos agregados é a seguinte (Tabela V.23):

Tabela V.23 Composição mineralógica dos agregados

Agregado	Figura	Composição mineralógica
Areia lavada	5.16	Quartzo – feldspato
Areia de gnaisse	5.17	Quartzo – feldspato – mica – piroxênio – caulinita
Areia de calcário	5.18	Calcita – quartzo
Brita de calcário	5.19	Calcita – quartzo

A seguir estão descritos algumas características destes minerais, conforme [PET 1978]:

- Quartzos: a sílica (SiO_2) livre ou constituindo silicatos com óxidos básicos é o componente mais abundante da crosta terrestre.
- Feldspatos: este silicato de alumínio forma 50% em peso da litosfera ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ – feldspato de cálcio, por exemplo, ou feldspato de potássio ou de sódio).
- Micas: são silicatos de alumínio de variada e complexa composição química, com fácil clivagem em lamelas finas, flexíveis e elásticas.
- Piroxênios: são silicatos de magnésio e ferro.
- Caulinita: é um silicato de alumínio hidratado por meteorização de rochas vulcânicas ou metamórficas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
- Calcita: carbonato de cálcio cristalino (CaCO_3), é um mineral muito abundante.

Alguns dos minerais presentes nas areias natural e de gnaiss apresentaram características expansivas, conforme resultados do ensaio de Reatividade Potencial (item 5.2.2).

Nos ensaios de DRX dos concretos (itens 5.7.5 a 5.7.9), além dos minerais componentes dos agregados, detectou-se a presença da portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$.

5.7.1 Areia Quartzosa Natural

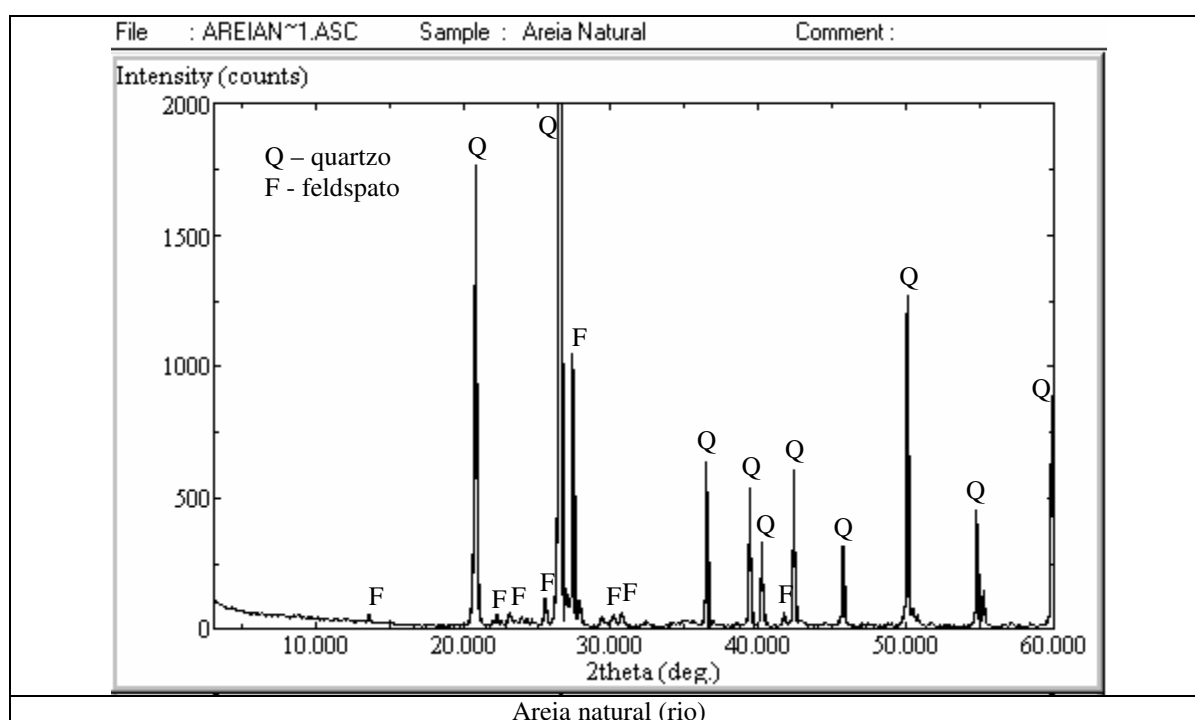


Figura 5.16 – DRX: Areia quartzosa natural

5.7.2 Areia artificial de gnaiss

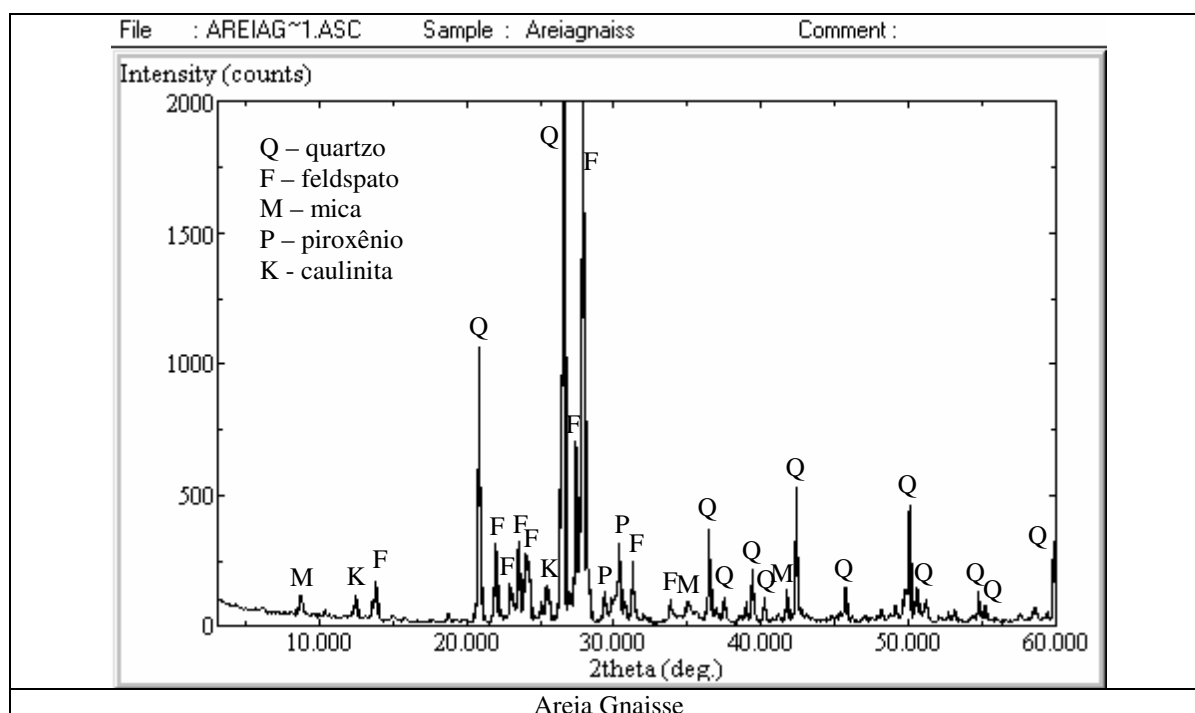


Figura 5.17. DRX: Areia artificial de gnaiss

5.7.3 Areia artificial de calcário

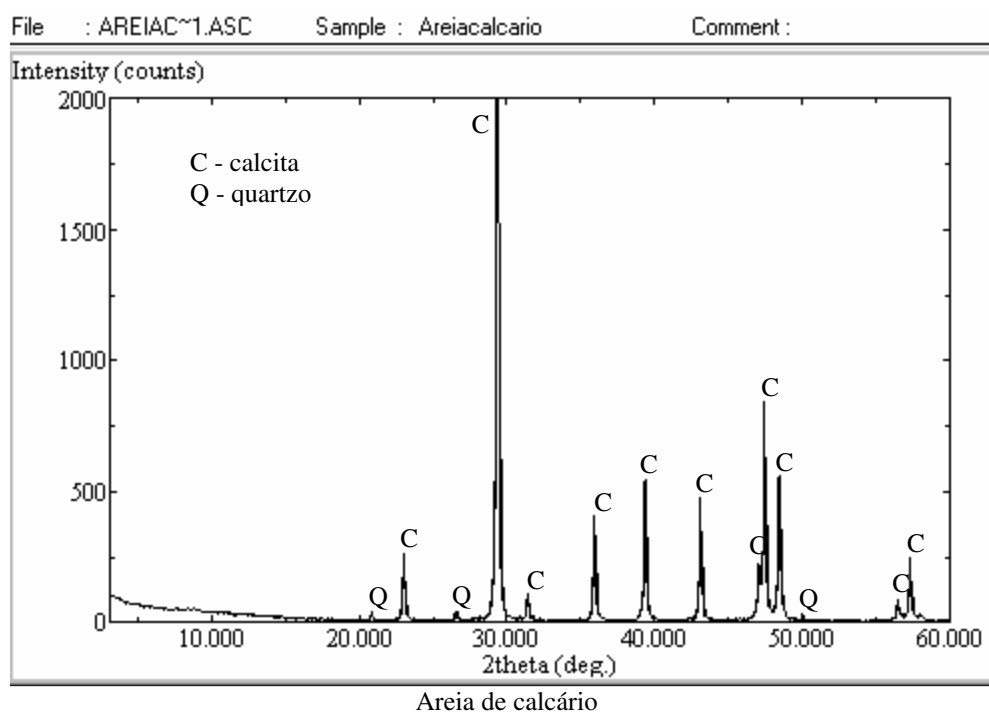


Figura 5.18. DRX: Areia artificial de calcário

5.7.4 Brita de calcário

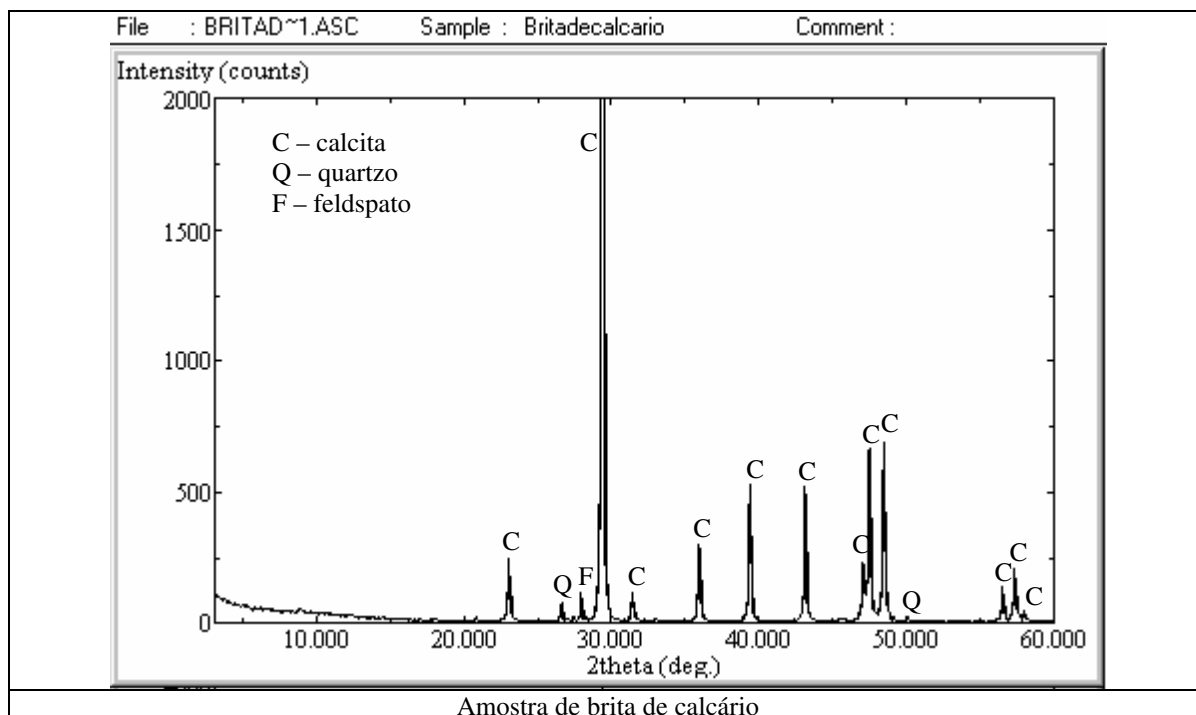


Figura 5.19. DRX: Brita de calcário

5.7.5 Concreto Mistura A (100N)

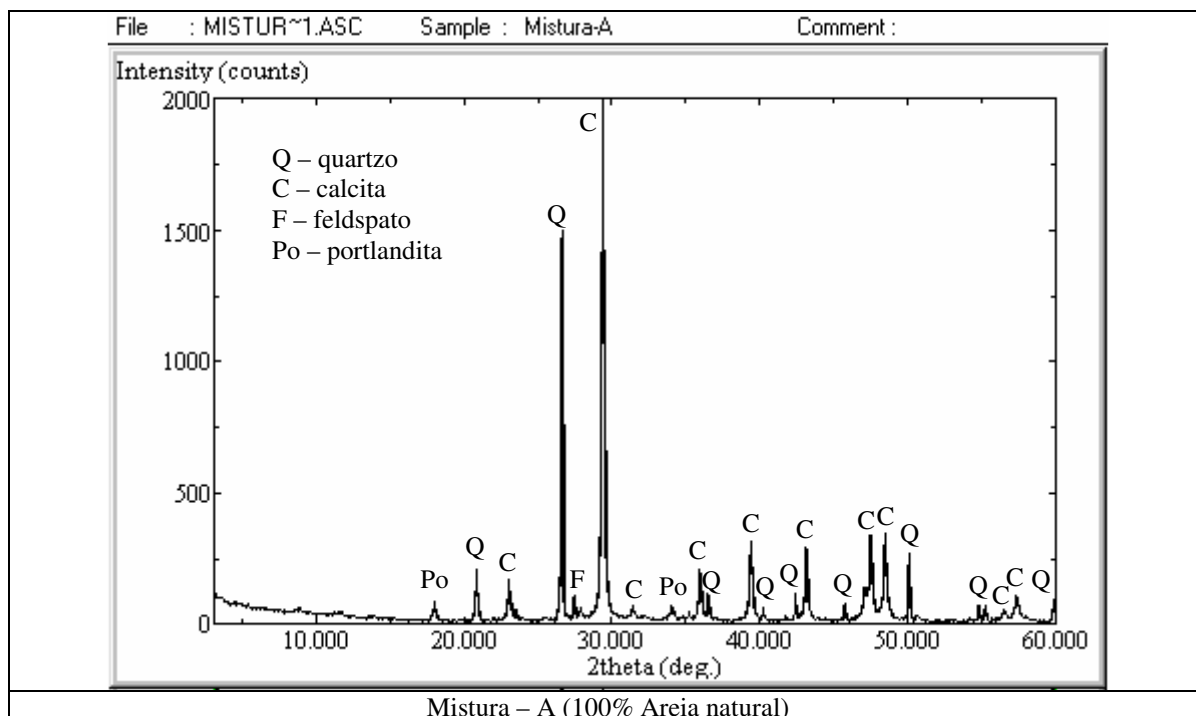


Figura 5.20 DRX: Concreto Mistura A (100 N)

5.7.6 Concreto Mistura D (40N + 60G)

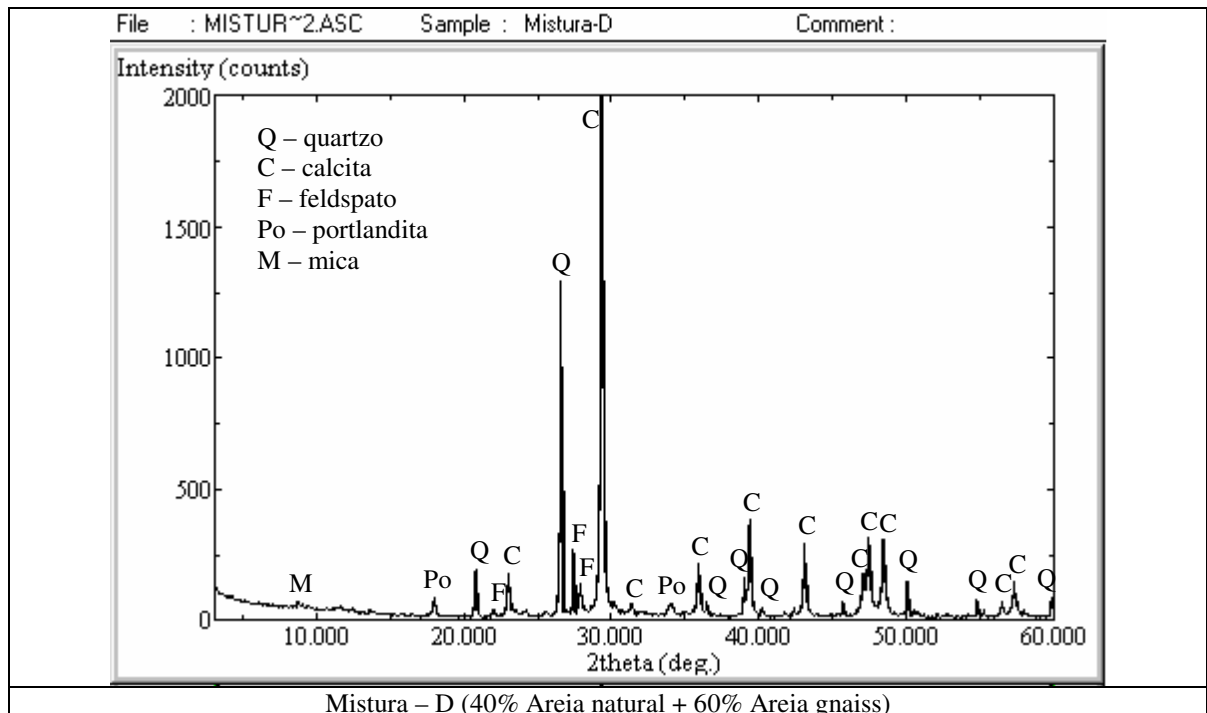


Figura 5.21 DRX: Concreto mistura D (40N + 60G)

5.7.7 Concreto Mistura F (100 G)

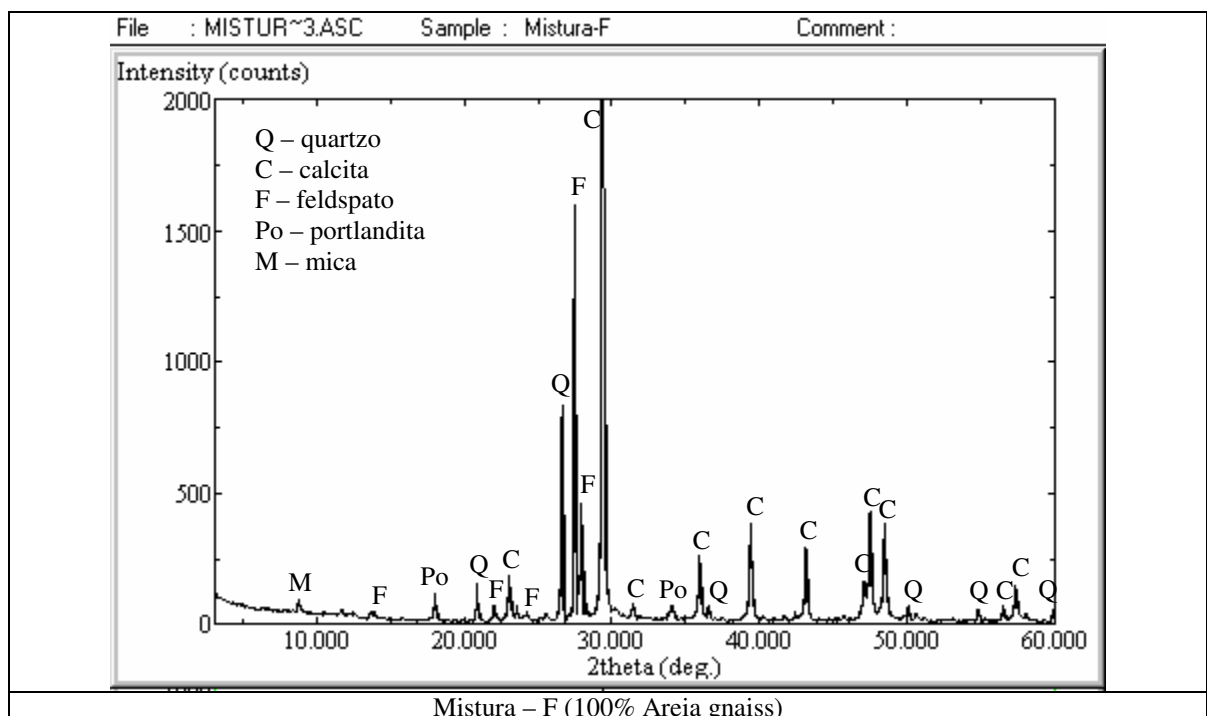


Figura 5.22 DRX: Concreto Mistura F (100 G)

5.7.8 Concreto Mistura I (40N + 60C)

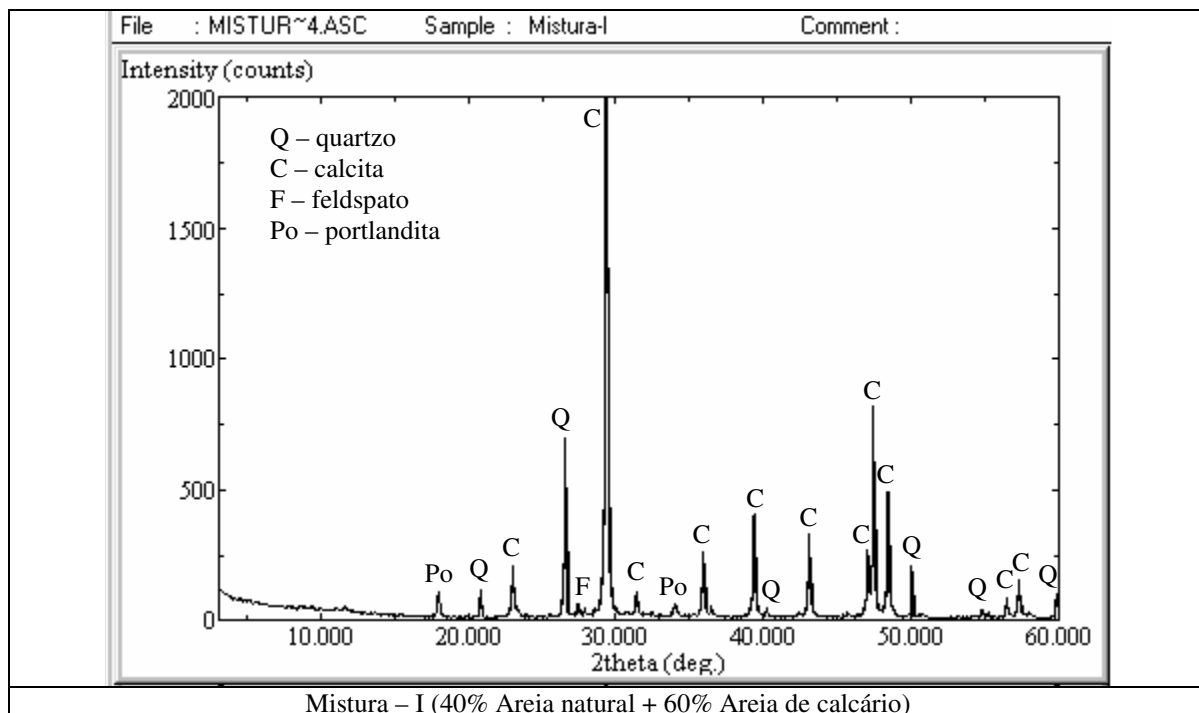


Figura 5.23 DRX: Concreto mistura I (40N + 60C)

5.7.9 Concreto Mistura L (100 C)

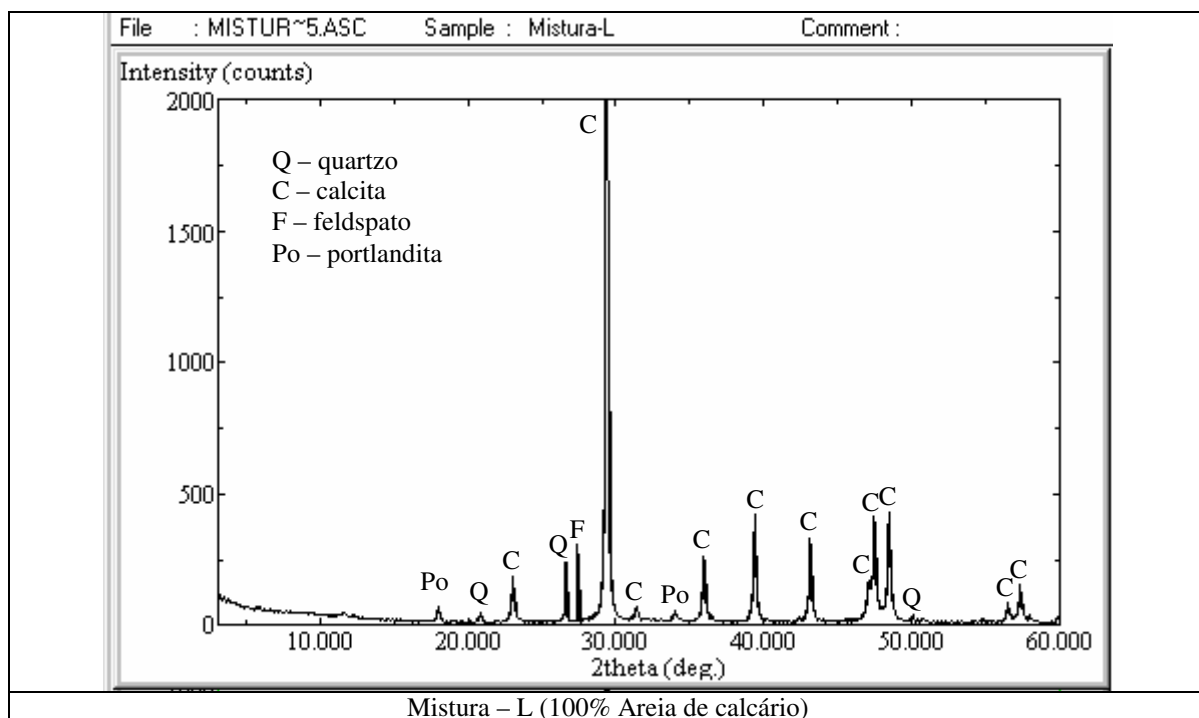


Figura 5.24 DRX: Concreto mistura L (100 C)

5.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Nos itens seguintes, as fotomicrografias e microanálises mais significativas dos agregados (areia e britas) e de cinco tipos de concretos, sobre seções fraturadas, sem polimento, são apresentadas com as seguintes considerações:

a) Forma e textura superficial dos agregados:

Conforme fotomicrografias [Figuras (5.25) a e b, (5.27) a e b, (5.28) a e b] e fotografias [Figuras (5.29) a e b], as partículas das areias de gnaiss e natural e das britas n^{os} 0 e 1 apresentaram um formato mais equidimensional, enquanto que as partículas da areia de calcário têm características mais lamelares.

b) Composição química dos agregados:

b.1) Areia quartzosa natural

Nos ensaios de DRX (item 5.8.1) os minerais encontrados foram quartzo e feldspato, confirmados pelo ensaio MEV-EDS, que acusou maior presença de quartzo (SiO_2), com teor de 89,64% (Figura 5.25 – b.1).

b.2) Areia artificial de gnaiss

Nos ensaios de DRX (item 5.8.2) os minerais encontrados foram quartzo, feldspato, mica, piroxênio e caulinita. Nos ensaios de MEV-EDS, os óxidos presentes nestes minerais foram confirmados, conforme Figura (5.27 – b.1):

- Quartzo: SiO_2 (52,65%)
- Feldspato: Al_2O_3 (18,08%); Na_2O (3,21%) e K_2O (3,26%)
- Mica: silicatos de alumínio (SiO_2 e Al_2O_3)
- Piroxênio: silicatos de magnésio e ferro [MgO (2,30%) e Fe_2O_3 (11,07%)].

b.3) Areia artificial e brita de calcário

Nos ensaios de DRX (itens 5.8.3 e 5.8.4) os minerais encontrados foram calcita, quartzo e feldspato. Nos ensaios de MEV-EDS, os óxidos presentes nestes minerais foram confirmados, conforme Figuras (5.28 – b.1) e (5.29 – c.1):

- Calcita (CaO): 89,03% e 95,92%
- Quartzo (SiO₂): 3,74% e 2,45%
- Feldspato, na brita de calcário: pequenas quantidades dos óxidos constituintes.

Trata-se, então, de calcário calcítico, de alta qualidade, inerte, ou seja, não reativo, conforme ensaios de reatividade potencial (item 5.2.2).

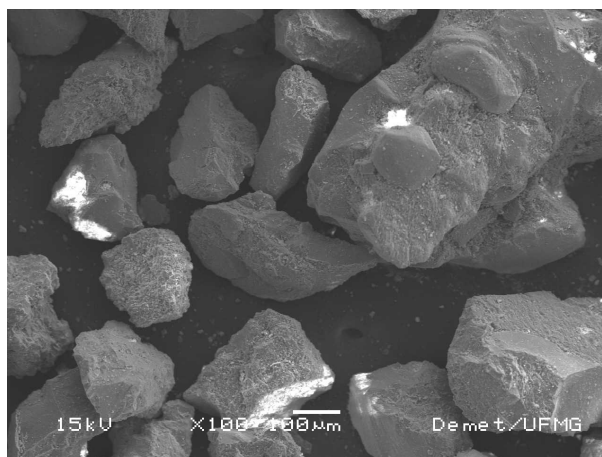
c) Estrutura da zona de transição dos concretos

Conforme item 3.1.5.2, a ligação cimento-agregado tem papel fundamental nas propriedades do concreto.

Observando a Figura (5.33 a e c) [concreto I (40% areia natural + 60% areia calcário)] e Figura (5.34 – a e b) [concreto L (100% areia calcário)], nota-se contato íntimo entre a calcita e a pasta de cimento hidratado, sem intervalo entre estas duas.

Contrariamente, observando a Figura (5.32 – b) [concreto F (100% areia de gnaïsse)], notamos um intervalo maior entre a pasta de cimento e o grão de areia de gnaïsse; na mesma figura, fotomicrografia (5.32 – a), o contato entre a pasta e a calcita presente na brita de calcário é íntimo, sem intervalo.

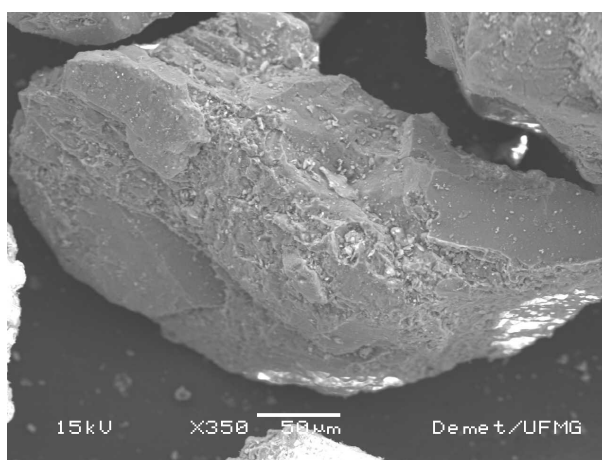
5.8.1 Areia Quartzosa Natural



a)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
Ox%	0.00	0.16	0.31	6.99	87.32	0.34	0.39	1.61	0.72	0.12	2.04

a.1)



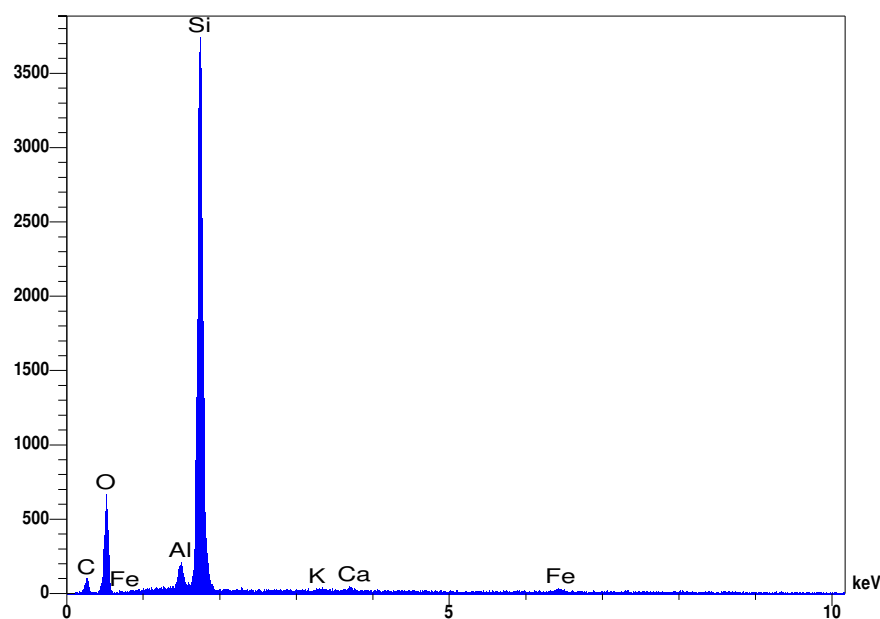
b)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
Ox%	0.00	0.61	0.64	4.43	89.64	0.62	0.71	0.63	0.84	0.26	1.61

b.1)

Figura 5.25 • MEV: areia quartzosa natural

- fotomicrografia: aumento de 100x (a) e 350x (b)
- microanálise: análise geral (a.1) e análise do grão (b.1)



SpectraPlus Report

Company ThermoNORAN

User Quest

File Areia Natural – Analise Grao– area 350x

Acquisition Parameters

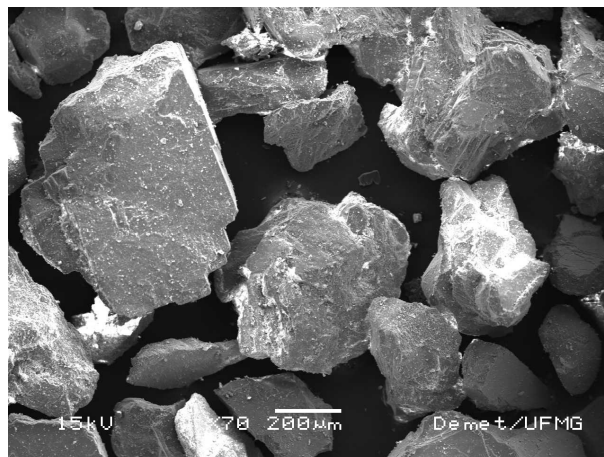
Accelerating voltage (kV)	15.0
Beam current (nA)	780.0
Magnification	2500
Live time	30
Preset Time (s)	30

Measures & Results

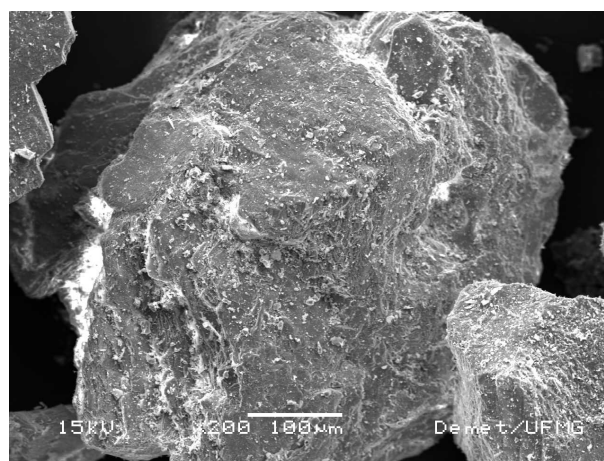
Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF	Formula	Ox%	Cat#
O						51.95	65.85	0.0000		0.00	0.00
Na	Ka	7.3	0.4932	0.0059	0.0023	0.45	0.40	1.9710	Na2O	0.61	0.15
Mg	Ka	8.4	0.5299	0.0065	0.0026	0.39	0.32	1.5100	MgO	0.64	0.12
Al	Ka	58.4	1.3951	0.0454	0.0177	2.35	1.76	1.3272	Al2O3	4.43	0.64
Si	Ka	1076.4	5.9899	0.8819	0.3437	41.90	30.26	1.2192	SiO2	89.64	11.03
P	Ka	4.6	0.3927	0.0043	0.0017	0.27	0.18	1.6110	P2O5	0.62	0.06
S	Ka	5.0	0.4084	0.0052	0.0020	0.28	0.18	1.3994	SO3	0.71	0.07
K	Ka	7.7	0.5081	0.0110	0.0043	0.53	0.27	1.2224	K2O	0.63	0.10
Ca	Ka	8.3	0.5252	0.0132	0.0051	0.60	0.30	1.1679	CaO	0.84	0.11
Ti	Ka	1.6	0.2292	0.0032	0.0012	0.16	0.07	1.2460	TiO2	0.26	0.02
Fe	Ka	5.9	0.4421	0.0233	0.0091	1.13	0.41	1.2430	Fe2O3	1.61	0.15
				1.0000	0.3897	100.00	100.00			100.00	12.45

Figura 5.26 EDS: areia quartzosa natural (análise do grão)

5.8.2 Areia Artificial de Gnaiss



a)



b)

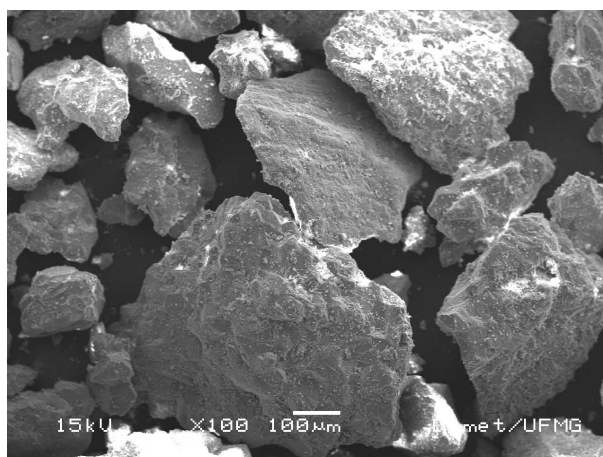
Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
a.1) Ox%	0.00	3.61	1.51	16.98	64.44	0.59	0.55	4.98	3.55	0.00	3,79
b.1) Ox%	0.00	3.21	2.30	18.08	52.65	0.83	0.23	3.26	6.46	1.92	11.07

b.1)

Figura 5.27 • MEV: areia artificial de gnaiss

- fotomicrografia: aumento de 70x (a) e 200x (b)
- microanálise: análise geral (a.1) e análise do grão (b.1)

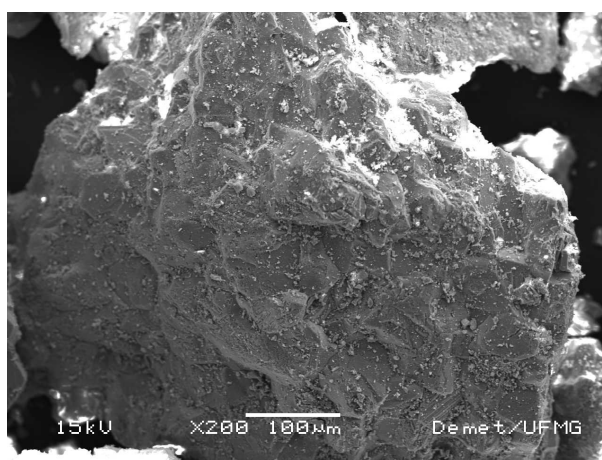
5.8.3 Areia Artificial de Calcário



a)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Ox%	0.00	0.26	1.24	4.46	21.66	1.33	1.39	1.23	67.14	1.28

a.1)



b)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Ox%	0.00	0.15	0.84	2.06	3.74	1.56	1.37	0.54	89.03	0.71

b.1)

Figura 5.28 • MEV: areia artificial de calcário

- fotomicrografia: aumento de 100x (a) e 200x (b)
- microanálise: análise geral (a.1) e análise do grão (b.1)

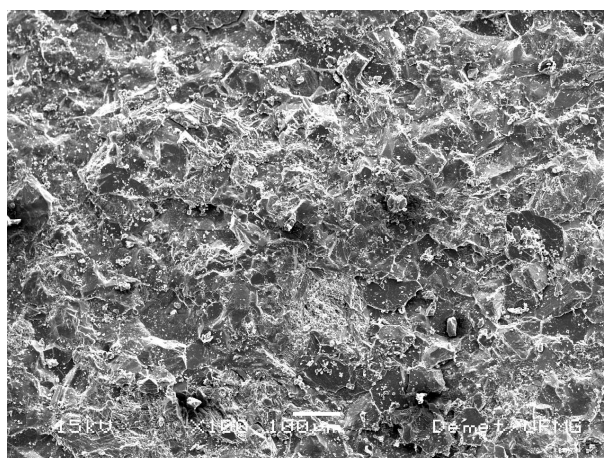
5.8.4 Brita de Calcário



a)



b)



c)

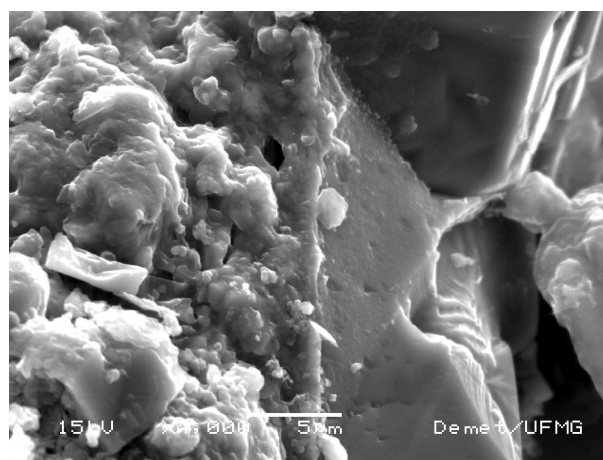
Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
Ox%	0.00	0.00	0.19	0.76	2.45	0.28	95.92	0.40

c.1)

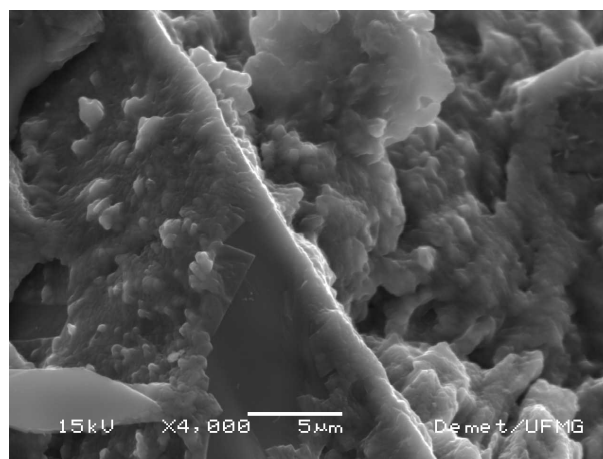
Figura 5.29 • MEV: brita de calcário

- fotografia: brita 0 (a) e brita 1 (b)
- fotomicrografia: aumento de 100x (c)
 - microanálise: análise geral (c.1)

5.8.5 Concreto Mistura A (100N)



a)



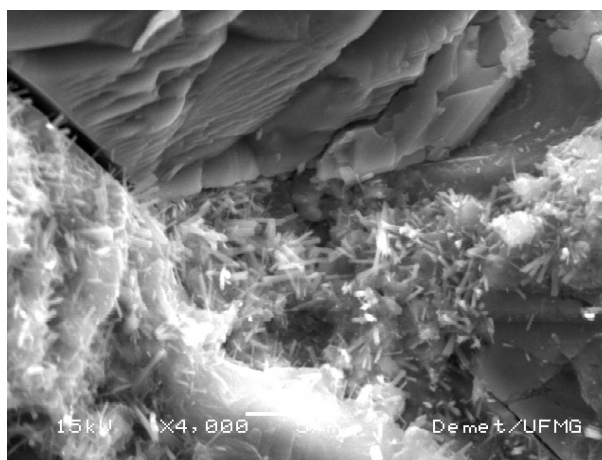
b)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
a.1) Ox%	0	1.43	2.27	5.76	29.35	0.00	0.00	1.37	57.78	0.00	2.04
a.2) Ox%	0	1.24	1.34	3.42	10.59	1.54	2.96	1.69	76.46	0.24	0.51
a.3) Ox%	0	1.22	1.49	1.66	1.32	1.36	0.97	0.52	91.20	0.11	0.15
b.1) Ox%	0	2.00	2.23	3.53	8.21	2.44	1.90	1.71	76.45	0.53	0.99
b.2) Ox%	0	1.19	1.19	9.23	27.29	1.67	1.32	5.27	51.25	0.39	1.21
b.3) Ox%	0	1.99	0.91	18.29	58.37	1.19	0.77	12.2	5.26	0.39	0.61

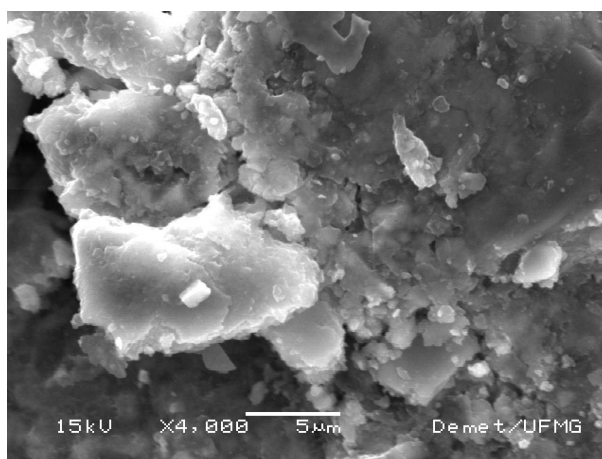
Figura 5.30 • MEV: concreto mistura A (100N)

- fotomicrografia: pasta x brita (4000x) (a) e pasta x areia natural (4000x) (b)
- microanálise: pasta (a.1), interface pasta x brita (a.2), brita (a.3), pasta (b.1), interface pasta x areia (b.2) e grão areia natural (b.3)

5.8.6 Concreto Mistura D (40N + 60G)



a)



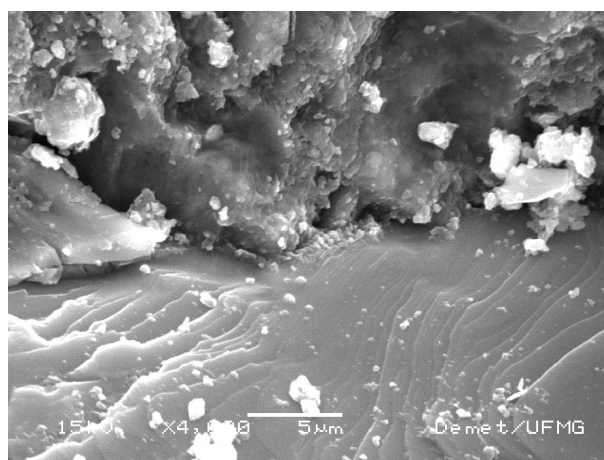
b)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
a.1) Ox%	0	0.17	1.26	9.55	23.55	0.95	10.63	1.62	50.81	0.00	1.45
a.2) Ox%	0	0.11	0.54	2.31	8.45	0.83	2.86	0.46	84.20	0.08	0.17
a.3) Ox%	0	0.18	0.76	1.91	5.18	1.33	2.79	0.48	87.07	0.12	0.17
b.1) Ox%	0	0.00	0.23	4.77	18.19	0.72	2.64	1.04	70.54	0.13	1.75
b.2) Ox%	0	0.00	0.00	8.25	23.85	0.43	3.20	1.21	60.92	0.21	1.92
b.3) Ox%	0	0.77	1.31	32.40	44.36	0.87	1.47	2.00	10.20	0.33	6.28

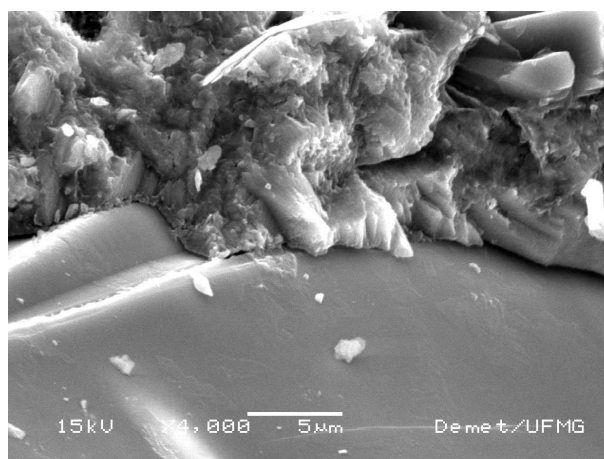
Figura 5.31 • MEV: concreto mistura D (40N + 60G)

- fotomicrografia: pasta x brita (4000x) (a) e pasta x areia de gnaiss (4000x) (b)
- microanálise: pasta (a.1), interface pasta x brita (a.2), brita (a.3), pasta (b.1), interface pasta x areia (b.2) e areia de gnaiss (b.3)

5.8.7 Concreto Mistura F (100G)



a)



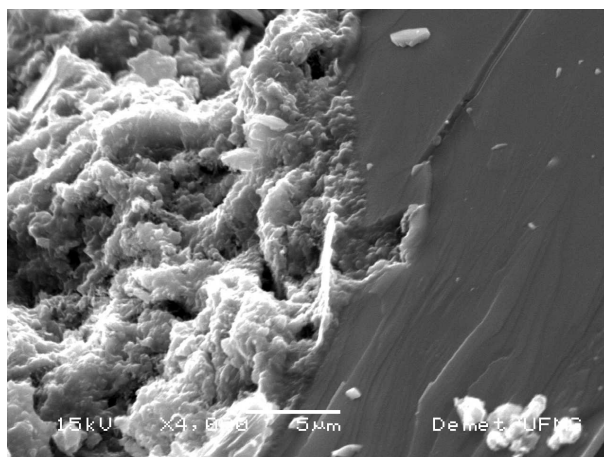
b)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
a.1) Ox%	0	0.65	0.46	1.70	11.93	2.41	0.96	5.17	75.85	0.30	0.58
a.2) Ox%	0	1.00	1.52	1.41	3.72	1.09	0.85	1.34	88.37	0.34	0.35
b.1) Ox%	0	0.76	0.64	2.02	35.42	1.23	1.01	1.84	56.38	0.24	0.45
b.2) Ox%	0	0.64	0.68	1.19	90.98	0.94	0.89	0.56	3.69	0.13	0.28

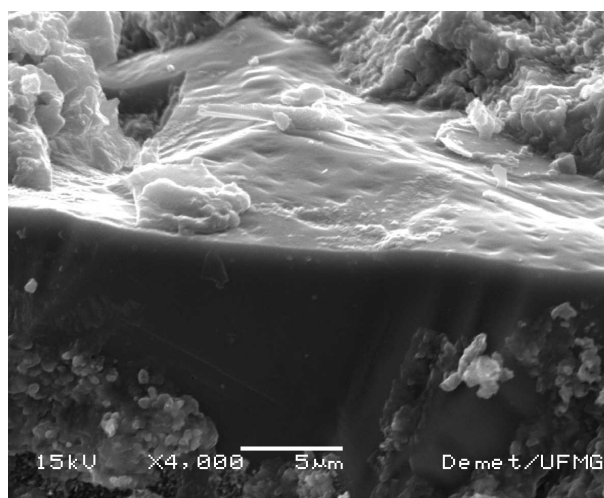
Figura 5.32 • MEV: concreto mistura F (100 G)

- fotomicrografia: pasta x brita (4000x) (a) e pasta x areia de gnaiss (4000x) (b)
- microanálise: interface pasta x brita (a.1), brita (a.2), interface pasta x areia (b.1) e grão areia de gnaiss (b.2)

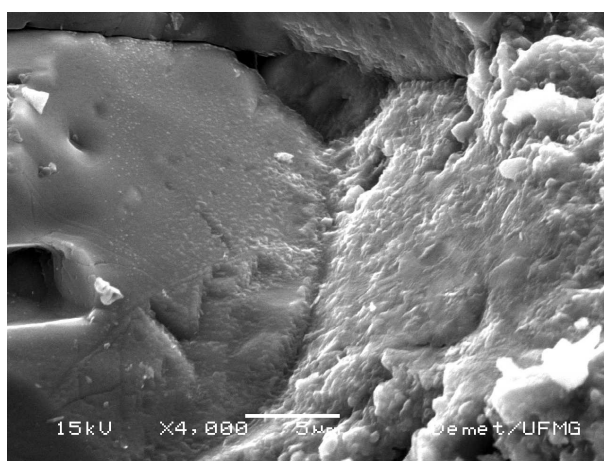
5.8.8 Concreto Mistura I (40N + 60C)



a)



b)



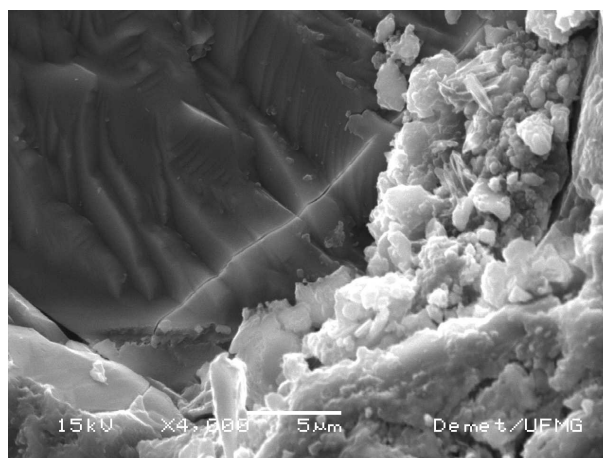
c)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
a.1) Ox%	0	0.16	0.18	6.76	18.45	0.53	0.56	3.09	68.94	0.24	1.08
a.2) Ox%	0	0.54	0.37	4.44	17.88	0.94	0.87	3.70	70.44	0.25	0.57
a.3) Ox%	0	0.00	0.14	0.46	1.40	0.61	0.34	0.30	95.94	0.26	0.54
b.1) Ox%	0	0.06	1.31	4.10	11.88	0.67	0.26	3.80	76.78	0.29	0.83
b.2) Ox%	0	0.15	0.16	1.86	62.78	0.70	0.52	1.55	31.78	0.16	0.34
b.3) Ox%	0	0.00	0.00	0.11	98.69	0.00	0.20	0.09	0.55	0.12	0.23
c.1) Ox%	0	0.13	0.16	3.83	20.15	0.56	0.34	4.94	68.09	0.20	1.60
c.2) Ox%	0	0.82	1.28	2.73	7.24	1.61	1.37	4.01	79.85	0.23	0.87
c.3) Ox%	0	1.06	1.80	1.23	1.43	1.73	0.93	0.49	90.63	0.28	0.43

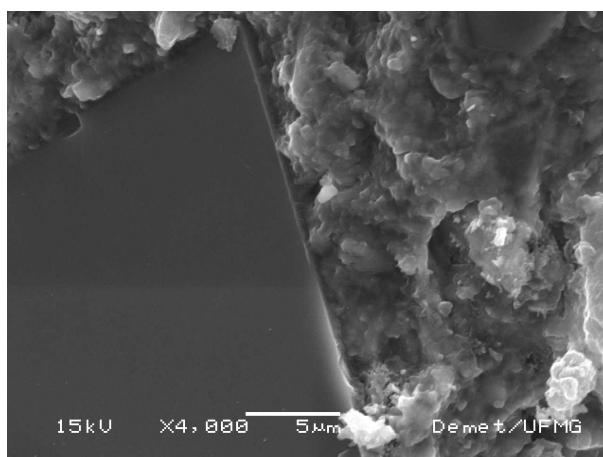
Figura 5.33 • MEV: concreto mistura I (40N + 60C)

- fotomicrografia: pasta x areia de calcário (4000x) (a), pasta x areia natural (4000x) (b) e pasta x brita de calcário (4000x) (c)
 - microanálise: pasta (a.1), interface pasta x areia de calcário (a.2), grão areia de calcário (a.3), pasta (b.1), interface pasta x areia natural (b.2), grão areia natural (b.3), pasta (c.1), interface pasta x brita (c.2) e brita (c.3)

5.8.9 Concreto Mistura L (100C)



a)



b)

Elemento	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
Fórmula		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
a.1) Ox%	0	1.05	1.33	3.69	12.98	1.39	1.21	2.36	75.46	0.19	0.34
a.2) Ox%	0	0.13	0.26	2.88	11.87	0.23	1.44	6.77	74.44	0.24	1.75
a.3) Ox%	0	0.19	0.69	0.60	0.98	0.72	0.32	0.29	95.70	0.17	0.34
b.1) Ox%	0	0.15	0.55	5.01	22.75	0.58	0.28	6.25	62.11	0.19	2.13
b.2) Ox%	0	0.00	0.19	2.45	13.81	0.70	0.54	4.14	77.46	0.15	0.56
b.3) Ox%	0	0.00	0.23	0.87	2.77	0.54	0.52	0.63	93.89	0.20	0.36

Figura 5.34 • MEV: concreto mistura L (100 C)

- fotomicrografia: pasta x brita 1000x (a) e pasta x areia de calcário 4000x (b)
- microanálise: pasta (a.1), interface pasta x brita (a.2), brita (a.3), pasta (b.1), interface pasta x areia (b.2) e grão areia de calcário (b.3)

5.9 O ENGENHEIRO E O MEIO AMBIENTE

Os agregados miúdos quartzosos, naturais, estão cada vez mais escassos nos grandes centros urbanos, devido aos seguintes fatores:

- aumento do consumo;
- expansão urbana, ocupando antigas zonas produtoras de areia, deslocando a extração para regiões cada vez mais distantes, com aumento nos custos de operação e transporte;
- Maior conscientização ambiental do ser humano, que busca cada vez mais resgatar suas dívidas para com a natureza, respeitando seus rios, suas florestas e tudo que interfere no equilíbrio ambiental.

O engenheiro tem um papel fundamental na preservação ambiental em várias de suas atividades: nas construções, nas extrações de minerais, nas pesquisas e aplicações de resíduos (adições minerais, finos de pedras britadas e entulho de construção civil).

Apesar de parecer um entrave a mais para o já instável setor da construção civil, as obras que implantaram o sistema de gestão de resíduos vêm apresentando resultados surpreendentes. Os principais são a redução de custos e de perdas de material.

6 CONCLUSÃO

As principais conclusões foram as seguintes:

6.1 BENEFICIAMENTO DOS AGREGADOS MIÚDO

O beneficiamento dos agregados miúdo (areias natural, de gnaïsse e de calcário), por peneiramento, para atendimento a NBR 7214 (areia normal para ensaios de cimento), contribuiu positivamente nas propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido.

O beneficiamento das areias, com frações iguais em cada peneira, e a mistura destas areias com britas n°0 e n°1, teve como resultado uma mistura de agregados com uma curva granulométrica contínua, sem deficiências ou excessos de qualquer fração, com poucos vazios entre as partículas.

A granulometria é talvez a propriedade mais importante do agregado após a sua resistência, com influência na compactidade e em todas as propriedades do concreto.

Sendo o cimento a fração de custo mais elevado, o concreto com poucos vazios necessita de menor teor de argamassa (45,3% nas misturas de concreto estudadas) e por conseqüente, menor teor de pasta e de cimento, resultando um concreto de custo mais baixo.

6.2 FORMA DOS AGREGADOS

O agregado graúdo, brita n°1, apresentou índice de forma (1,5) inferior ao valor máximo (3,0) especificado pela NBR 7809 – ABNT.

Quanto a forma dos agregados miúdo, pela ordem, as areias com formato mais equidimensional são: areia de gnaïsse, areia natural e areia de calcário.

Na microscopia eletrônica de varredura, fotomicrografia das areias e britas, observa-se, também, um formato mais equidimensional das partículas das areias, de gnaiss e natural, e britas nº0 e nº1, enquanto que as partículas da areia de calcário têm características mais lamelares.

A forma das partículas dos agregados tem influência nas propriedades do concreto; a melhoria da forma dos agregados, miúdos e graúdos, propiciaria a redução de vazios na mistura de agregados e, também, redução do teor de argamassa para preenchimento dos vazios e custo dos concretos.

6.3 REATIVIDADE POTENCIAL DOS AGREGADOS

Os agregados miúdo, areia natural e areia de gnaiss, apresentaram no ensaio de reatividade potencial comportamento lentamente reativo, demonstrando a necessidade da realização do ensaio rotineiramente, procedimento não muito comum nas obras de pequeno porte e sim nas de grande volume de concreto, como barragens de usinas hidroelétricas.

6.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Com a utilização de aditivos químicos plastificantes, adequados, o bombeamento dos concretos (mistura A a L) é possível, tendo em vista suas características de coesão (sem segregação), textura (facilidade no acabamento), retenção de água (oposto de exsudação) e manutenção da consistência (slump).

6.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Resultados na mesma ordem de grandeza ou superiores, comparados com os citados nas referências bibliográficas e os estimados pelo ACI: American Concrete Institute (ACI318 e ACI363).

6.6 ESTRUTURA DA ZONA DE TRANSIÇÃO DOS CONCRETOS

Os ensaios mecânicos executados mostraram uma interface (pasta x agregado) eficiente com a utilização de agregado calcário; a superfície de fratura dos corpos de prova prismáticos (tração na flexão) passa através das partículas dos agregados graúdo, na maioria dos casos.

Nos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, nota-se um contato íntimo entre a calcita e a pasta de cimento hidratado, sem intervalo entre a pasta e a calcita, comprovando a eficiência superior da interface entre o calcário e a pasta.

6.7 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A técnica de difração de raios X permitiu a identificação de diversas fases presentes nas estruturas dos agregados e dos concretos.

Alguns dos minerais presentes nas areias natural e de gnaiss apresentaram características expansivas, conforme resultados do ensaio de reatividade potencial.

6.8 INFLUÊNCIA DO TIPO DE AGREGADO MIÚDO (AREIA BRITADA DE GNAISSE E DE CALCÁRIO) NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS CONCRETOS, NA IDADE DE 28 DIAS

As variações máximas, em relação ao concreto da mistura A (100N), foram as seguintes:

- Resistência à compressão (f_c):
 - acréscimo de 4,1%, mistura H (60N + 40C)

- Resistência à tração por compressão diametral (f_{TD}):
 - acréscimo de 14,3%, misturas F (100G) e K (20N + 80C)

- Resistência à tração na flexão (f_{ctM}):
 - acréscimo de 19,6%, mistura K (20N + 80C)
- Módulo elasticidade dinâmico (E_d):
 - acréscimo de 12,0%, misturas E (20N+80G), F (100G), I (40N+60C) e L (100C)
- Módulo de elasticidade estático (E):
 - acréscimo de 8,0%, misturas F (100G), G (80N + 20C) e K (20N + 80C)

A explicação para o acréscimo da resistência mecânica dos concretos, tendo como agregado miúdo areias artificiais de rochas britadas, pode estar na ligação pasta de cimento x agregado, a chamada zona de transição. Esta ligação tem papel fundamental nas propriedades do concreto.

No caso da areia artificial de gnaiss, com partículas de textura áspera, a ligação mecânica é devida à rugosidade superficial do agregado, sendo que os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas da superfície do agregado.

Na areia de calcário é provável que a continuidade da estrutura do agregado nos produtos de hidratação do cimento ocorra por crescimento epitáxico. Nos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, nota-se um contato íntimo entre o agregado calcário e a pasta de cimento hidratado.

6.9 COMPOSIÇÃO IDEAL DOS AGREGADOS MIÚDO

As propriedades dos agregados, como tamanho, graduação, forma e textura da superfície, têm marcante influência sobre as propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido; a forma e a textura afetam a mobilidade do agregado, ou seja, a facilidade com que as partículas movem-se umas sobre as outras quando manipuladas; as ligações (mecânica, epitáxica, química etc.) cimento-agregado tem papel fundamental nas propriedades do concreto endurecido.

Baseado nos resultados obtidos, na escassez de areias natural de qualidade, na influência da textura superficial das partículas dos agregados na trabalhabilidade do concreto e das ligações cimento-agregado nas propriedades do concreto endurecido, o ideal seria misturar os agregados miúdo, na seguinte proporção:

- 20% areia natural;
- 80% areia artificial de rocha britada.

6.10 MEIO AMBIENTE

Desenvolvimento, sim, mas com inteligência (extração e preservação). Os materiais considerados resíduos, como as areias artificiais de rochas britadas, e outros resíduos citados neste trabalho, podem contribuir para o desenvolvimento sustentável do planeta Terra.

6.11 CONCLUSÕES FINAIS

A utilização de areias artificiais de rochas britadas, e o seu beneficiamento por peneiramento, contribuiu significativamente para a melhoria das propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido.

São importantes as pesquisas sobre cimento Portland e aditivos químicos. Entretanto, não se deve esquecer dos agregados, que ocupam aproximadamente 70% do volume dos concretos, nos seguintes aspectos:

- reatividade potencial: fazer do ensaio uma rotina e não somente nos agregados utilizados em grandes obras;
- composição granulométrica: utilizar mistura de agregados com curva granulométrica contínua, sem deficiências ou excessos de qualquer fração, com poucos vazios entre as partículas;

- forma: investir na obtenção de agregados britados com formato mais equidimensional, com influência no teor de vazios entre as partículas e no custo dos concretos;
- zona de transição: estudar a natureza e desenvolvimento dessa zona de ligação entre cimento e agregados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ABB 1994] ABBUD, A. R. et al, *O uso exclusivo de areia artificial em concretos de barragens* – XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, 1994.

[ABCP 1994] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Guia Básico de Utilização de Cimento Portland*. 2 ed. São Paulo: [s.n], 1994. 25p.

ACI 214-65 – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE

[AHM 1989] AHMED, E.A.; EL KOURD, A.A. *Properties of concrete incorporating natural and crushed stone very fine sand*. ACI Materials Journal, v.86, nº4, July-August, 1989.

[AIT 1990] AITCIN, P.; MEHTA, P. K. *Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete*. ACI Material Journal, vol. 87, nº 2, 1990, p. 103 – 107.

[AIT 1990] AITCIN, P.C; P. K. MEHTA. *Effect of Coarse-Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete*. ACI Materials Journal, v.87, nº2, March-April, 1990.

[AIT 1998] AITCIN, P. C.; MINDESS, S. *High-performance concrete: science and applications*. Material Science of Concrete V, The American Society Ceramic, Westerville, 1998, p. 477 – 511.

[AIT 2000] AITCIN, P.C. *Concreto de Alto Desempenho*. 1 ed. São Paulo: Pini, 2000. 667p.

[AJD 2002] AJDUKIEWIEZ, A. *Influence of recycled aggregate on mechanical properties of HS/HPC*. Cement and Concrete Composites, vol. 24, nº 2, 2002, p. 269 – 279.

[ALM 1990] ALMEIDA, I. R. *Betões de Alta Resistência e Durabilidade – Composição e Características*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ICT, Lisboa, 1990, 740 p.

[ALM 1991] ALMEIDA, R. *Forma Tecnológica: As Novidades Reveladas pela Usina Angolana*. Revista Construção, nº 2252, São Paulo – SP, Ed. PINI, abril, 1991, p. 8 - 9.

[ALM 1993] ALMEIDA, I. R. *Influência dos Componentes na Qualidade dos Concretos de Alto Desempenho – Agregados e Cimento* – Seminário sobre Cimento, Ciminias, 1993.

[ALM 2002] ALMEIDA, S. L. M. de; CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S. *Aproveitamento de areia de finos de pedreiras brasileiras para uso em construção civil*. Disponível em <http://www.minas.upm.es/rimin1/jornadas/0ibrtnmac.pdf>. Acesso em 13/04/2004.

[AND 1993] ANDRIOLO, F. R.; SGARBOZA, B.C. *Inspeção e controle de qualidade do concreto*. São Paulo: Newswork, 1993.

[ANS 1941] ANSTETT, “Essai et analyse des matériaux de construction et des travaux publics”, Tomo 1, Ed. Eyrolles, Paris, 1941, p. 184.

[ASS 1989] ASSELANIS, J. G.; AITCIN, P. C.; MEHTA, P. K. *Effect of Curing Conditions on the Compressive Strength and Elastic Modulus of Very High Strength Concrete*. ASTM Cement, Concrete and Aggregates, vol. 11, 1989, p. 80-83.

[BAA 1991] BAALBAKI, W.; BENMOKRANE, B.; CHAALLAL, O.; AITCIN, P. C. *Influence of coarse aggregate on elastic properties of high performance concrete*. ACI Material Journal, 1991, Sept.-Oct., p. 499 - 503.

[BAS 2003] BASTOS, SANDRA R.B. *Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção de concretos convencionais*. 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Vitória-ES, 2003.

[BAU 1994] BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 435p. V.1.

[BAU 1998] BAUER, R.J.F.; SHUNJI, T.; CURTI, R. *Estudo de concretos preparados com agregado miúdo artificial e areia silicosa*. 40º REIBRAC do IBRACON, São Paulo, SP, 1998.

[BED 1983] BEDARD, C.; AITCIN, P. C. *A la Recherche d'un Béton de 150 MPa*. Canadian Journal of Civil Engineering, National Research Council, Canada, vol. 10, nº 4, 1983, p. 600-613.

[BEN 2000] BENERT, T. *Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications*. Transp. Res. Rec.(1714), 2000, p. 33 – 39.

[BET 2002] REVISTA BETON NEWS. n.º 59. JAN. FEV. MAR. 2002.

[BIC 1972] BICZOK, I. *Corrosion y Proteccion Del Hormigon*. 6º ed., Bilbao – España, ed. Urmo S. A. de Ediciones, 1972, p. 275 – 280.

[BON 1994] BONAVENTTI, V.L; IRASSAR, E. F. *The effect of stone dust content in sand*. Cement and Concrete Research, Tarrytown, vol. 24, nº 3, p.580-590, 1994.

[BOR 2002] BORGES, P. H. R. *Caracterização Microestrutural do Cimento Portland Branco*, Dissertação Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, UFMG. Belo Horizonte, 2002.

[BRA 2000] BRASIL MINERAL. n.º 190. DEZ. 2000

[BRO 1998] BROWN, B. *Agregates for concrete*. Concrete, maio, 1998.

[BRU 1997] BRUSCHI, D. M., PEIXOTO, M. C. D., *Extração de areia cascalho e argila*; Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 1997. 90p. V.4.

[BUC 1986] BUCHER, H.R.E. *Agregados para concreto*. I Simpósio Nacional de Agregados. Anais, p.7-16. São Paulo, 1986.

[BUC 1966] BUCK, A. D.; DOLCH, W. L. *Investigation of reaction involving nondolomitic limestone aggregate in concrete*. Journal of the ACI, 1966, p. 755-765.

[BUR 1989] BURNETT, I. *High Strength Concrete in Melbourne, Austrália*. Concrete International, ACI, vol. 11, nº 4, 1989, p. 17-25.

[CAB 1997] CABRERA, H. O.; DONZA, H. *High-strength concrete with crushed fine aggregates*. XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, San Carlos, Brazil, vol. 5, 1997, pp. 2099 – 2107.

[CAR 1981] CARRASQUILLO, R. L.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O. *Properties of High Strength Concrete Subject to Short Term Loads*, ACI Journal, vol. 78, nº 3, 1981, p. 171-178.

[CEL 1996] CELIK, T; MARAR, K. *Effects of crushed stone dust on some properties of concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 26, nº7, p.1121-1130, 1996.

[CET 1998] AYKUT CETIN, RAMON L. CARRASQUILLO. *High-performance concrete: Influence of coarse aggregates on mechanical properties*. ACI Material Journal, v. 95, nº3, May-Jun 1998.

[CHA 1971] CHATTERJI, S.; JEFFERY, J. W. *The nature of bond between different types of aggregates and Portland Cement*. Indian Concrete Journal, Cement Marketing, Bombay, 1971, p. 346-349.

[COU 1973] Coutinho, Souza de A. *Fabrico e Propriedades do Betão*, LNEC, vol. I, 1973, 610 pp.

[COU 1988] Coutinho, Souza de A. *Fabrico e Propriedades do Betão*. 2 ed. Lisboa: Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1988. 401p. V. 1.

[CUC 2000] CUCHIERATO, G. *Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico*. Dissertação Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 201p. 2000.

[CUS 1972] CUSSINO, L.; PINTOR, G. *An investigation into the different behaviour of silicic and calcareous aggregates in mixes with regard to the mineralogical composition of the cement*. II Cemento, nº 4, 1972, p. 255-268.

[DIA 1992] DIAMOND, S.; MINDESS, S. *SEM Investigations of fracture surfaces using stereo pairs: I. Fracture surfaces of rock-cement paste composite specimens*. Cement and Concrete Research, Tarrytown, vol. 22, nº 1, p. 67 – 78, 1992.

[DON 2002] DONZA, H., CABRERA, O., IRASSAR, E. F. *High-Strength Concrete With Different Fine Aggregate*. *Cement And Concrete Research*, Tarrytown, vol. 32, p. 1775-1761, MAY 2002.

[DUR 1961] DURIEZ et ARRAMBIDE, “Nouveau traité de Materiaux de Construction”, 1961, Tomo I, Ed. Dunod, p.192.

[ELI 2002] ELIA, A., LORENZO, M., WILFRIDO, M., LUIS, V. Mechanical properties of concrete elaborated with igneous aggregates. *Cement and Concrete Research*, Tarrytown, vol. 32, p. 317-321, MAY 2002.

[ERD 1997] ERDOGAN, T. Y. *Admixtures for Concrete*. Middle East Technical University Press, Ankara, 1997.

[FER 2002] FERREIRA, RODRIGO M.; GAVA, GIOVANNA,P.; MALOKOSKI, JADER JOB; MENEGHETTI, LEILA CRISTINA. *Utilização de pó-de-pedra em substituição parcial do agregado miúdo na confecção de concreto*. 44º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Belo Horizonte, MG, 2002.

[FRE 1971] FRENCH, P. J. et al. *High Concrete Strength Within the Hour*. *Concrete*, vol. 5, nº 8, 1971, p. 253-258.

[FUR 1997] EQUIPE DE FURNAS, LABORATÓRIO DE CONCRETO, DEPARTAMENTO DE APOIO E CONTROLE TÉCNICO; EDITOR, WALTON PACELLI DE ANDRADE. AUTORES: GAMBALE, E. A.; ALVES, E. F. R.; GUERRA, E. A.; VEIGA, F. N.; CARMO, J. B. M.; NASCIMENTO, J. F. F.; FONTOURA, J. T. F.; SANTOS, M. C.; PIMENTA, M. A.; TRABOULSI, M. A.; ANDRADE, M. A. S.; GRAÇA, N. G.; ANDRADE, N. P. H.; GUEDES, Q. M.; BITTENCOURT, R. M.; ANDRADE, W. P. *Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: Ensaio e propriedades*. Ed. Pini, São Paulo – SP, 1997.

[GAL 2004] M. GALETAKIS, S. RAKA. *Utilization of limestone dust for artificial stone production: an experimental approach*. *Minerals Engineering*, vol. 17, 2004.

[GIA 1992] GIACCIO, G.; ROCCO, C.; VIOLINI, D.; ZAPPITELLI, J.; ZERBINO, R. *High-strength concretes incorporating different coarse aggregates*. *ACI Material Journal*, vol. 89, nº 3, 1992, p. 242 – 246.

[GIL 1993] GILLOT, M.; NAIK, T.R.; SINGH, S.S. Microstructure of fly ash containing concrete, with emphasis on the aggregate paste boundary, Proceedings. 51st annual Meeting of the Microscopy Society of America, p. 1148-1149, 1993.

[GLE 2003] GLENCROSS-GRANT, P., WALKER, P. *Survey of building sands in Australia*. Construction and Building Materials, Oxford, vol. 17, p. 259-268, JUN 2003.

[GUI 2002] G.V. GUINEA, K. EL-SAYED, C.G. ROCCO, M. ELICES, J. PLANAS. *The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 32, 2002.

[HAN 1992] HANSEN, T. C. *Recycled aggregate and recycled aggregate for concrete*. In: Recycling of Demolished Concrete and Masonary, RILEM Report, n° 6, E & FN Spon, London, U. K., 1992.

[HAQ 1981] HAQUE, M. N. *No slump concrete with fine sand and clay*. Cement and Concrete Research, v.11, n°4, July 1981, p.531-539.

[HAR 1969] HARRIS, A. J. *High Strength Concrete: Manufacture and Properties*. The Structural Engineer, vol. 47, n° 11, 1969, p. 441-446.

[JAC 1995] JACOBSEN, S.; MARCHAND, J.; HORNAIN, H. *SEM Observations of the frost deteriorated and self-healed concretes*. Cement and Concrete Research, Tarrytown, vol. 25, n° 8, p. 1781-90, 1995.

[JAM 2004] S.S. JAMKAR, C.B.K. RAO. *Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning*. Cement and Concrete Research, received 9 october; accepted 1 march 2004.

[KAL 1977] KALCHEFF, I.V. *Portland cement concrete with stone sand*. Special Engineering Report, National Crushed Stone Association, Washington, p.20, 1997.

[KAT 2003] AMNON KATZ. *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 33, 2003.

[KIH 1984] KIHARA, Y. *O Desenvolvimento do Concreto no Brasil*. I Seminário – Tecnologia da Elkem Microsílica, São Paulo, 1984, 21 pp.

[KIH 1986] KIHARA, Y. *Reação Álcali-Agregado: Aspectos Mineralógicos*. 1º Simpósio Nacional de Agregados, São Paulo – SP, junho, 1986, p. 127 – 138.

[KIH 1988] KIHARA, Y.; ZAMPIERI, V. A. *Microscopia eletrônica de varredura: perspectivas e potencialidades no aprimoramento da qualidade dos cimentos nacionais*. In: 38º REUNIÃO DE TÉCNICOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, ago, 1988, São Paulo.

[KIM 1997] KIM, J.K.; LEE, C.S.; PARK, C.K.; EO, S.H. *The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 27, nº11, 1997.

[KIM 2002] JIN-KEUN KIM, SANG HUN HAN, YOUNG CHUL SONG. *Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results*. Cement and Concrete Research, vol. 32, 2002.

[KIN 1972] KING, G. J. W., and DICKIN, E. A., “The evaluation of shapes in silica sands from a simple flow test”, Mat. Et Const., Ess. Rech., Ed. RILEM, 1972, nº 26, p.85.

[LAR 1996] LARA & FRANÇA CONSULTORES ASSOCIADOS. Relatório de pesquisa: *Influência das areias artificiais calcárias (ICAL) nas propriedades dos concretos de cimento Portland*. São José da Lapa, MG, 1996.

[LAR 1987] LARRARD, F.; BOULEY, C.; ROSSI, P. *Fracture Toughness of High Strength Concretes. Utilization of High Strength Concrete*, Tapir Pub., Trondheim, Norway, 1987, p. 215-223.

[LEV 1997] LEVY, SALOMON MONY. *Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos*. Dissertação de mestrado em engenharia civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997, p.145.

[LIG 2001] NEVES, LÍGIA. *Aplicação dos finos gerados pela produção de pedras britadas graníticas no concreto pré-misturado em substituição às areias naturais*. Dissertação mestrado em engenharia mineral pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

[LIN 2004] YONG-HUANG LIN, YAW-YAUAN TYAN, TA-PENG CHANG, CHING-YUN CHANG. *An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates*. Cement and Concrete Research, received 18 december 2002; accepted december 2003.

[LOU 1952] LOUDON, A. G., "The computation of permeability from simple soil tests", *Geotechnique*, Dez. 1952, vol. III, nº 4, p. 165.

[MAL 1976] MALHOTRA, V. M. *Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods*. ACI Monograph, nº 9, 1976.

[MAL 1985] V.M. MALHOTRA AND G.G. CARETTE. Performance of concrete incorporating limestone dust as partial replacement for.

[MAR 2003] MARZOUK, H.; LANGDON, S. *The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete*. Cement and Concrete Composites, vol. 25, 2003.

[MAS 2002] M. MASLEHUDDIN, ALFARABI M. SHARIF, M. SHAMEEM, M. IBRAHIM, M.S. BARRY. *Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes*. Construction and Building MATERIALS, vol. 17, 2002.

[MEH 1986] MEHTA, P. K. *Concrete: Structure, Properties and Mateials*. New Jersey, Ed. Prentice-Hall, 1986, p. 145 – 150.

[MEH 1994] MEHTA P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 1 ed. São Paulo: Pini, 1994. 581p.

[MIN 1992] MNDESS, S.; DIAMOND, S. SEM. *Investigations of fracture surfaces using stereo pairs: II. Fracture surfaces of rock-cement paste composite specimens*. Cement and Concrete Research, Tarrytown, vol. 22, nº 4, p. 678 – 688, 1992.

[MIN 2000] MINÉRIO & MINERALES, AGREGADOS (II). *Areia Industrial Ganha Mercado*, AGO 2000.

[MON 1985] MONTEIRO, P. J. M. *Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties*. Berkeley, University of California, 1985, 153 p., Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) – Graduate Division, University of California, 1985.

[MON 1986] MONTEIRO, P. J.; MEHTA, P. K. *Improvement of the Aggregate-Cement Paste Transition Zone by Grain Refinement of Hydration Products*. 8º Congresso Internacional de Química do Cimento, Cmmunications Theme 2, vol. III, Rio de Janeiro, 1986, p. 433-437.

[NAI 1998] NAIK, T.R.; SINGH, S.; RAMME, B. *Mechanical Properties and Durability of Concrete made with blended fly ash*. ACI Materials Journal, v.95, nº4, 1998.

[NEV 1978] NEVILLE, A. M. *Properties of concrete*. 2nd Edition, Pitman Publishing Limited, London, p.133, 1978.

[NEV 1982] NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 1 ed. São Paulo: Pini, 1982. 828p.

NORMA ASTM C78 – Standard test method for flexural strength of concrete.

NORMA ASTM C469 – Static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression.

NORMA ASTM C496 – Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.

NORMA ASTM C-1260/01 – Reatividade potencial álcali-agregado.

NORMA ASTM C-114/97 – Determinação de álcalis solúveis de cimentos.

NORMA NBR 5732 – Cimento Portland comum.

NORMA NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial.

NORMA NBR 5735 – Cimento Portland de alto-forno.

NORMA NBR 5736 – Cimento Portland pozolânico.

NORMA NBR 5737 – Cimentos Portland resistentes a sulfatos.

NORMA NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.

NORMA NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

NORMA NBR 5742 – Análise química de cimento portland – Processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.

NORMA NBR 5743 – Cimento Portland – Determinação de perda ao fogo.

NORMA NBR 5744 – Cimento Portland – Determinação de resíduo insolúvel.

NORMA NBR 5745 – Cimento Portland – Determinação de anidrido sulfúrico.

NBR 5746 – Cimento Portland – Determinação de enxofre na forma de sulfeto

NORMA NBR 5747 – Cimento Portland – Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama.

NORMA NBR 5748 – Análise química de cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre.

NORMA NBR 6474 (NM-23) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da área específica.

NORMA NBR 7211 – Agregado para concreto.

NORMA NBR 7214 – Areia normal para ensaio de cimento.

NORMA NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

NORMA NBR 7216 (NM-26) – Amostragem de agregados.

NORMA NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.

NORMA NBR 7218 – Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

NORMA NBR 7219 – Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos.

NORMA NBR 7220 – Agregado – Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo.

NORMA NBR 7222 – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

NORMA NBR 7223 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

NORMA NBR 7224 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da área específica.

NORMA NBR 7227 (NM-13) – Cimento Portland – Determinação do óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.

NORMA NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária.

NORMA NBR 7809 – Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.

NORMA NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência.

NORMA NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman.

NORMA NBR 9777 (NM-30) Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos.

NORMA NBR 9937 Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.

NORMA NBR 11578 – Cimento portland composto.

NORMA NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200).

NORMA NBR 11582 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Lê Chatelier.

NORMA NBR 11583 – Cimento portland e matérias-primas – Determinação de anidrido carbônico (CO₂) por gasometria.

NORMA NBR 11768 – Aditivos para concreto de cimento Portland.

NORMA NBR 12142 (MB 3483) – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos.

NORMA NBR 13278 – Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

NORMA NM 65 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega.

NORMA NM 76 – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).

[NUG 1979] NUGENT, F.R. *Ensaio com areia artificial – como melhorar seu concreto*. Anais IBRACON, São Paulo, 1979.

[ÖZT 1997] ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths*. Cement and Concrete Research, vol. 27, nº 2, 1997, p. 165 – 170.

[PAR 1969] PARROT, L. J. *The production and properties of high strength concrete*. Concrete, vol. 3, nº 11, 1969, p. 443-448.

[PAU 1991] PAULON, A. V. *Estudos da Microestrutura da Zona de Transição entre a Pasta de Cimento e o Agregado*, Tese Doutorado em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

[PER 1998] ANNA-LENA PERSSON. *Image analysis of shape and size of fine aggregates*. Engineering Geology, vol.50, 1998.

[PET 1978] PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de Cimento Portland*. 5 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1978. 307p.

[PET 1978] PETRUCCI, E.G.R. *Materiais de Construção*. 3 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1978. 435p.

[PIN 1989] PINTO, T. P. *Utilização de resíduos de construção – estudo do uso em argamassas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos (Departamento de Arquitetura e Planejamento) Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 1989, 148 p.

[POO 2002] PON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. *Use of recycled aggregate in molded concrete bricks and blocks*. Constr. Build. Mater., vol. 16, nº 5, 2002, p. 281 – 289.

[POP 1979] POPOVICS, S. *Concrete - Making Materials*. Hemisphere Pub. Corp. Washington, p.208-210,1979.

[POS 2003] POSSAN, EDNA; GAVA, GIOVANNA PATRÍCIA; MENEGHETTI, LEILA CRISTINA; MALAKOSKI, JADER JOB. *Estudo comparativo de concretos de resistência normal e alta, com a utilização de pó-de-pedra e aditivo superplastificante*. 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Vitória, ES, 2003.

PROCEDIMENTO FURNAS 1.04.16 – Reatividade potencial álcali-agregado.

PROCEDIMENTO FURNAS 1.02.52 – Determinação de álcali solúveis de cimentos.

PROCEDIMENTO FURNAS 4.15.03 – Operação do difratômetro de Raios X.

PROCEDIMENTO FURNAS 4.15.04 – Preparação de amostras para difratometria de Raios X.

PROCEDIMENTO FURNAS 4.15.11 – Análises por difração de Raios X.

[QUE 2002] QUEBAUD, MÍRIAN R.; COSTA, GUILHERME M.; BENEDETTO, RAFAEL D.; SALLES, NIOAC. *Metodologia para a reciclagem de resíduos minerais sólidos como agregados de substituição*. 44º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Belo Horizonte, MG, 2002.

[RAN 1989] RANDALL, V.; FOOT, K. *High Strength Concrete for Pacific First Center*. Concrete International, ACI, vol. 11, nº 4, 1989, p. 14-16.

[RAY 1945] RAYLEIGH, J. *Teory of Sound*, 1945.

[REL 033] RELATÓRIO DCT.T.01.033.2004 – *Reatividade Potencial* – Furnas Centrais Elétricas S/A Goiânia, GO, Abril/2004.

[REL 0162] Relatório nº0162.DR/96 – Consultare – Ical Industria de Calcinação Ltda – Belo Horizonte – Maio, 1996.

[REL 1983] RELATÓRIO N.O 007/83. *Consórcio Andrade Gutierrez / Mendes Júnior. Pavimento Rígido. Análise e Estatística (ACI 214-65)*, Belo Horizonte, ABR 1983. 45p.

[RIG 1998] RIGO, S. C. A. *Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia para Caracterização e Análise Estrutural de Concretos de Cimento Portland*; Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, UFMG. Belo Horizonte, 1998. 410p.

[ROD 2002] RODRIGUES, A. *Pesquisadores produzem areia clonada no Rio de Janeiro*. Notícias. Disponível em http://www.arvore.com.br/noticia/2002_1/n10013. acesso em 13/04/2004.

[SAL 1998] SALLES, F.M.; CARVALHO, P.A.; PEREIRA, P.N.; BUCHALA, E. *Características e desempenho de concretos confeccionados com areia artificial para as obras do complexo Canoas*. 40º REIBRAC do IBRACON, São Paulo, SP, 1998.

[SAR 1987] SARKAR, S. L.; AITCIN, P. C. *Comparative study of the microstructure of normal and very high-strength concretes*. ASTM Cement, Concrete and Aggregates, vol. 9, nº 2, 1987, p. 57-64.

[SAU 1980] SAUCIER, K.L. *High Strength Concrete, Past, Present, Future*. Concrete International, ACI, vol. 2, nº 6, 1980.

[SBR 1975] SBRIGHI, CLÁUDIO N. *A influência da natureza petrográfica da areia britada e seus finos em algumas propriedades do betão*. Tese apresentada no Laboratório Nacional de Engenharia, Lisboa, 1975.

[SCA 1986] SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLLO, F.R.. *Concreto e seus materiais: Propriedades e ensaios*.

[SCR 1989] SCRIVENER, K. L. *The use of backscattered electron microscopy and image analysis to study the porosity of cement paste.* In: MATERIALS RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM: PORE STRUCTURE AND PERMEABILITY OF CEMENTITIOUS MATERIALS, vol. 137, 1989, Pittsburgh.

[SHA 1992] SHAYAN, A. *Prediction of Alkali Reactivity Potential of Some Australian Aggregates and Correlation With Service Performance.* USA, ACI Material Journal, jan/feb, 1992, vol. 89, n° 1, p. 16 – 19.

[SHA 2001] SHAN SOMAYAZL. *Civil Engineering Materials.*

[SIL 1996] SILVA, M. R. *Técnicas de observação e análise.* Brasília, UNB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. 1996, 22 p. (Notas de Aula).

[SIV 1989] SIVASUNDARM, V.; CARETTE, G. C.; MALHOTRA, V. M. ACI Material Journal, vol. 86, 1989.

[SKO 1992] SKOG, D. A.; LEARY, J. J. *Principles of instrumental analysis.* 4° ed., Fort Worth: Saunders College Publishing, 1992, 814 p.

[STU 1991] STUTZMAN, P. E. *Cement clinker characterization by scanning electron microscopy.* Cement, Concrete and Aggregates, Philadelphia, vol. 13, n° 2, p. 109-14, 1991.

[SWA] SWAMY, R. N. *The nature of strength of concrete,* unpublished draft.

[TAV 1996] TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. *Strengths of recycled aggregate concrete madding using field-demolished concrete as aggregate.* ACI Material Journal, vol. 93, n° 2, 1996, p. 182 – 190.

[TAV 1996] TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. *Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate*. ACI Materials Journal, v. 95, n°4, 1998.

[TEC 2004] TECHNE: Edição 82, ano 12, Janeiro de 2004.

[TER 2002] TERRA, L.E. M. *Finos de pedreira para execução de concreto estrutural. Práticas recomendadas. Concreto e o meio ambiente*. ABESC: Associação brasileira das empresas de serviços de concretagem. Disponível em <http://www.abesc.org.br/meio/praticasrecomendadas>. Acesso em 13/04/2004.

[TIE 2003] TIECHER, F; ANDREETTA, G.; PANDOLFO, L. M. *Comparação de concreto dosado com areia natural e artificial*. 45° Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON – Vitória, ES, 2003.

[TOB 1978] TOBIN, R. E., “Flow cone sand tests”, J. Am. Conc. Inst., Jan. 1978, p.1.

[TRO 1968] TROXELL, G.E.; DAVIS,H.; KELLY, J.W. *Composition and properties of concrete*. 2nd Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, p.88, 1968.

[TUT 1982] TUTHILL, L. H. *Alkali-Silica Reaction – 40 Year Later*. Concrete International, abril, 1982, p. 32 – 36.

[UCH 1996] HIROSHI UCHIKAWA, SHUNSUKE HANEHARA and HIROSHI HIRAO. *Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate*. Cement and Concrete Research, vol. 26, n°1, 1996.

[VAL 1961] VALENTA, O. *The significance of the aggregate-cement bond for durability of concrete*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE DURABILITY OF CONCRETE, Rilem, Prague, 1961, p. 53 – 87 (Preliminary Report).

[WOO 1997] WOOLEY, T.; KIMMINS, S.; HARRISON, P.; HARRISON, R. *Green building handbook*. London: E & FN Spon, 1997.

[YAS 2004] ERGÜL YASAR, YASIN ERDOGAN, ALSETTIN KILIÇ. Effect of limestone aggregate type and water-cement ratio on concrete strength. *Materials Letters*, vol. 58, 2004.

[WU 2001] KE-RU WU, BING CHEN, WU YAO, DONG ZHANG. *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete*. *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001.

[ZAG 1985] ZAGURSKIJ, V. A.; ZHADANOVSKIJ, B. V. *Breaking reinforced concrete and recycled crushed materials*. Research Institute for Concrete (GISSTROY), Moskow, 1985, Special Technical Report.

[ZAM 1993] ZAMPIERI, V. A. *Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico*. São Paulo, USP, 1993, 233 p., Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

[ZAK 1996] M. ZAKARIA and J. A. CABRERA. *Performance and durability of concrete made with demolition waste and artificial fly ash-clay aggregates*. *Waste Management*, vol. 16, 1-3, pp 151-158, 1996.

[ZAR 2003] I.H. ZARIF, A. TUĞRUL. *Aggregate properties of Devonian limestone for use in concrete in Istanbul, Turkey*. *Bull Eng. Geol. Env* (2003). Published online: 20 september 2003.

[ZHO 1995] ZHOU, F.; LYDON, F.; BARR, B. *Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete*. *Cement and Concrete Research*, vol. 25, nº 1, 1995, p. 177 – 186.

