

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

**EFEITO DA ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÕES
MINERAIS NA FORMULAÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS
LEVES AUTOADENSÁVEIS**

EDILBERTO VITORINO DE BORJA

Orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli

**NATAL- RN
FEVEREIRO 2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDILBERTO VITORINO DE BORJA

**EFEITO DA ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÕES
MINERAIS NA FORMULAÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS
LEVES AUTOADENSÁVEIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos pré-requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli

**NATAL- RN
Fevereiro - 2011**

DECLARAÇÃO

Declaramos, para os devidos fins, que o aluno **EDILBERTO VITORINO DE BORJA** foi aprovado(a) na DEFESA de TESE em PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA do Curso de DOUTORADO, no dia 10/02/2011, no(a) Sala 6 da Escola de Ciências e Tecnologia - ECT/UFRN, UFRN, cuja banca examinadora fora constituída pelos professores:

Doutor (a) ANTONIO EDUARDO MARTINELLI
(Presidente)

Doutor (a) MARCUS ANTONIO DE FREITAS MELO
(Externo ao Programa)

Doutor (a) MARIA DAS VITORIAS VIEIRA ALMEIDA DE SA
(Externo ao Programa)

Doutor (a) MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS
(Externo à Instituição)

Doutor (a) MARIA LUIZA LOPES DE OLIVEIRA SANTOS
(Externo à Instituição)

A sua TESE intitulou-se:

**EFEITO DA ADIÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA E ADIÇÕES MINERAIS NA
FORMULAÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS LEVES AUTOADENSÁVEIS**

Esta declaração não exclui o aluno de efetuar as mudanças sugeridas pela banca nem vale como outorga de grau de DOUTORADO, de acordo com o definido na Resolução 072/2004-CONSEPE.

Natal, 10 de Fevereiro de 2011.



CLDOMIRO ALVES JUNIOR
COORDENADOR(A) PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DEDICATÓRIA

“Cada dia que amanhece assemelha-se a uma página em branco, na qual gravamos os nossos pensamentos, ações e atitudes. Na essência, cada dia é a preparação de nosso próprio amanhã”.

Chico Xavier

*À **Deus**, meus **pais**, meus **irmãos** e **filhos** e a meus **amigos**, por esta oportunidade única de convívio e aprendizado.*

Louvado seja o Santo Nome do Senhor!

Amém!

AGRADECIMENTOS

- Á **DEUS**, pela mão de amparo eterna; por mais uma oportunidade de crescimento; pela minha família; pelos meus amigos; pelo meu trabalho; pela minha saúde e pelo meu provimento constante. Você é o **Cara!**;
- Ao **Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli**, orientador de extrema dedicação ao trabalho de disseminação do conhecimento e espelho de integridade, dinamismo, agilidade e sabedoria;
- A minha **família**, principal razão das minhas lutas e conquistas;
- Aos Professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da **UFRN**;
- Aos professores **Marcos Alyssandro** e **Maria Luiza**, pelo acompanhamento, ensinamento e mediadores das minhas indagações e divagações sobre ensaios e resultados laboratoriais;
- A professora **Ana Cecília**, pela grande contribuição técnico-científica à época da qualificação, com sugestões e orientações inestimáveis na etapa de conclusão deste trabalho;
- Ao professor **José Eurico**, pelo pronto atendimento em disponibilizar equipamentos da sua empresa **CONSULTEC Engenharia Ltda.** para ensaios mecânicos complementares, além de esclarecimentos e sugestões primorosas sobre concreto autoadensável e ao Tecnólogo **Elton Santos**, pela sempre solicitude na realização destes ensaios;
- Ao emérito professor **Maurício Pereira**, pelo companheirismo na etapa inicial das pesquisas;
- A professora **Danúbia Meira** pela orientação na organização do trabalho escrito, de grande valia no momento da primeira visualização da concretização do documento *Tese*;

- Ao **IFRN**, por mais esta oportunidade de capacitação e em especial aos professores da área de Construção Civil;
- Ao Prof. Msc. **Valtencir Lúcio**, companheiro e incentivador do ingresso e desenvolvimento das atividades de pesquisa deste trabalho;
- À **CINEXPAN S.A.**, pelo fornecimento da argila expandida e ao **CIMENTO POTY** (representada pela pessoa do engenheiro **Carlos Magno**) pelo cimento, materiais necessários e fundamentais para realização deste trabalho de pesquisa;
- Aos colaboradores do **Laboratório de Cimentos da UFRN**: Pablo, Júlio, Elizângela e Rodrigo, pelo apoio;
- Aos colegas de trabalho do **Laboratório de Processamento de Minérios e Resíduos do IFRN**: Lídia Deli, Pádua e Franciloli, pela préstimo na realização dos ensaios de Fluorescência e DRX;
- Aos demais **amigos**, pela atenção e disponibilidade nos momentos de descontração;

RESUMO

A busca por materiais alternativos de menor massa específica, redução na transferência de calor e propagação do barulho, associado à facilidade de manuseio e aplicação em estruturas de concreto armado, representa grande desafio na formulação e conhecimento do desempenho de concretos estruturais leves autoadensáveis, que tem tecnologia pouco difundida em nível nacional, e surge no cenário internacional como um material inovador e alternativo ao concreto convencional. Frente ao exposto, este trabalho se propôs a estudar concretos estruturais leves autoadensáveis elaborados com duas graduações distintas de argila expandida associados à inclusão de aditivos plastificantes/superplastificantes e adições minerais de metacaulim e cinza de biomassa de cana-de-açúcar. Tem-se ainda como objeto do estudo, a avaliação da atividade pozolânica das adições minerais e sua influência nas características de durabilidade dos concretos. As propriedades reológicas, físicas, mecânicas e microestruturais, analisadas neste estudo, serviram como fundamentação na qualificação dos concretos leves autoadensáveis, visando às exigências técnicas nacionais para sua classificação no quesito autoadensável e estrutural leve. A inclusão das adições minerais (metacaulim e cinza de biomassa de cana-de-açúcar), em substituição parcial do cimento, demonstrou atividade pozolânica e manutenção das propriedades mecânicas através do efeito filler, apresentando redução de até 76% da permeabilidade a gás nitrogênio na mistura com 20% de cinza de biomassa. Todos os concretos dosados apresentaram reologia (coesão e consistência) adequada para autoadensabilidade, bem como resistência e massa específica inerentes aos concretos estruturais leves, sem apresentar fenômenos de segregação e exsudação.

Palavras-Chave: Concreto estrutural leve, concreto estrutural leve autoadensável, permeabilidade, argila expandida, metacaulim, cinza de biomassa da cana de açúcar.

ABSTRACT

The search for alternative materials with lower density, reduction in heat transfer and propagation of noise associated with the ease of handling and application in concrete structures, represents an enormous challenge in the formulation and knowledge of the performance of self-compacting lightweight concrete, which has technology little known nationally, and appears on the international scene as an innovative material and alternative to conventional concrete. Based on these, this study set out to study self-compacting lightweight concrete made with two distinct grades of expanded clay associated with the addition of plasticizing/superplasticizers additives and mineral additions of metakaolin and bagasse ash of sugar cane. There is also an object of study, evaluation of pozzolanic activity of mineral admixtures and their influence on the durability characteristics of concrete. The rheological, physical, mechanical and microstructural analysis in this study served as basis in the classification of concretes autoadensáveis, targeting the national technical requirements for their classification in the category autoadensável and lightweight structural. The inclusion of mineral admixtures (metakaolin and bagasse ash of sugar cane), partial replacement of cement, pozzolanic activity and demonstrated maintenance of mechanical properties through the filler effect, a reduction of up to 76% of the nitrogen gas permeability in blend with 20% bagasse ash. All concretes had rheology (cohesion and consistency) suitable for self-adensability as well as strength and density inherent structural lightweight concrete without presenting phenomena of segregation and exudation.

Keywords: Structural lightweight concrete, self-compacting lightweight concrete, permeability, expanded clay, metakaolin, bagasse ash of sugar cane.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS, SIGLAS E NOMENCLATURAS

A	Área da seção do corpo-de-prova
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute
ARI	Alta resistência inicial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
C	Carga aplicada à seção do corpo-de-prova
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₄ AF	Ferro-Aluminato Tetracálcico
CP	Cimento Portland
C _p	Capacidade Calorífica
D _T	Difusividade Térmica
E	Módulo de deformação
EB	Especificação Brasileira
I _v	Índices de Vazios
K	Condutividade Térmica
MF	Módulo de Finura
MPa	MegaPascal
m _{sat}	Massa Saturada
m _s	Massa Seca
m _i	Massa Imersa

NBR	Norma brasileira Regulamentadora
q	Fluxo de calor
SSS	Saturada superfície seca
ρ_s	Massa específica da amostra seca
ρ_r	Massa específica real
ρ_{sat}	Massa específica da amostra saturada
σ	Tensão

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Micrografia eletrônica de varredura de pasta de cimento Portland: formação dos cristais CH (a) e, morfologia fibrosa do C-S-H, com três dias de idade (b) (MEHTA & MONTEIRO)	32
FIGURA 2.2	Micrografia da estrutura celular porosa interna do agregado leve de argila expandida, obtida por MEV (PEREIRA, 2008)	35
FIGURA 2.3	Agregados leves europeus: Leca (a), Litag (b) e Liapor (c) (OWENS, 2005)	38
FIGURA 2.4	Edifícios executados com concreto leve: Square Tower – 1967 (a), Park Regis – 1968 (b), Standart Bank – 1970 (c), BMW Building – 1972 (d) (ROSSIGNOLO, 2003)	43
FIGURA 2.5	Construções com pré-fabricados em concreto leve: Rússia – 1967 (a) e Áustria – 1968 (b) (ROSSIGNOLO, 2003)	44
FIGURA 2.6	Os três tipos de concreto leve: concreto com agregado leve (a), concreto aerado (b) e concreto sem finos (c) (MORAVIA, 2007)	45
FIGURA 2.7	Espectro dos agregados leves (MEHTA & MONTEIRO, 2008)	47
FIGURA 2.8	Classificação dos concretos leves e suas massas específicas secas (NEVILLE, 1997)	50
FIGURA 2.9	Vista lateral da Ponte Akashi-Kaikyo (a) e bloco de ancoragem (b) (WATANABE, 2008)	56
FIGURA 2.10	Fachada em CAA do Teatro Nacional no Hague (WALRAVEN, 2005 <i>apud</i> TUTIKIAN, 2007)	57
FIGURA 2.11	Ponte Shin-kiba Ohashi executada no Japão em CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003)	57
FIGURA 2.12	Comparação da composição da mistura entre CAA e concreto convencional (OKAMURA e OUCHI, 2003)	62
FIGURA 2.13	Representação esquemática de: partículas de cimento Portland em pastas sem aditivos (a); com aditivo superplastificante (b) e, com superplastificante e aditivo mineral de elevada finura (c) (CORDEIRO, 2006)	64
FIGURA 2.14	Morfologia das partículas da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com partículas de quartzo (CORDEIRO, 2006)	68
FIGURA 2.15	Otimização da quantidade da pasta (DACZO e VACHON,	71

	2006)	
FIGURA 2.16	Bloqueamento dos espaços das barras pelos agregados graúdos (DACZO e VACHON, 2006)	72
FIGURA 2.17	Equipamento tronco-cônico e base plana para ensaio <i>slump-flow</i> (CAVALCANTI, 2006)	75
FIGURA 2.18	Medição do diâmetro de espalhamento (MANUEL, 2005)	75
FIGURA 2.19	Ilustração do funil “V”	77
FIGURA 2.20	Ilustração da caixa “L” e medidas realizadas no ensaio (ALENCAR, 2008)	78
FIGURA 2.21	Detalhe do anel “J” (HOLM e RIES, 2006)	79
FIGURA 2.22	Desenho esquemático da coluna de segregação (ALENCAR, 2008)	80
FIGURA 3.1	Relação entre a massa específica seca e a resistência à compressão de concreto leve confeccionado com vários tipos de agregados leves europeus (<i>British Cement Association, 2002 apud CLARKE, 2005</i>)	87
FIGURA 3.2	Módulos de elasticidade para concretos leves (ACI 213)	89
FIGURA 3.3	Ilustração do comportamento da curva tensão-deformação dos concretos com agregados leves (CARRAQUILLO <i>et al. Apud</i> ROSSIGNOLO, 2006)	90
FIGURA 3.4	Visualização da espessura da zona de transição e formação de cristais (etringita) na superfície da casca do agregado leve (LO e CUI, 2004)	92
FIGURA 3.5	Modelo simplificado da rede de poros do concreto (PEREIRA, 2008)	93
FIGURA 3.6	Distribuição do tamanho de poros na pasta de cimento endurecida (CASCUDO, 1997)	95
FIGURA 3.7	Fases do concreto e sua interdependência com a resistência à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 2008)	96
FIGURA 3.8	Efeito de entrelaçamento entre poros do agregado e a pasta cimentícia circundante (LO e CUI, 2004)	98
FIGURA 3.9	Valores dos diâmetros de espalhamento para diferentes relações água/materiais finos dos concretos autoadensáveis e respectivos tipos de agregados (TOPÇU e UYGUNOĞLU, 2010)	104

FIGURA 4.1	Fluxograma do programa experimental – PARTE 1: CONCRETO ESTRUTURAL LEVE (CEL)	112
FIGURA 4.2	Fluxograma do programa experimental – PARTE 2: CONCRETO ESTRUTURAL LEVE AUTOADENSÁVEL (CELA)	113
FIGURA 4.3	Bagaço da cana-de-açúcar usado como combustível (a) e coleta da cinza (b)	117
FIGURA 4.4	Imagem da cinza de biomassa de cana-de-açúcar	118
FIGURA 4.5	Argilas expandidas utilizadas no estudo: AE-0500 (a) e, AE-1506 (b)	120
FIGURA 4.6	Amostras cilíndricas para ensaio de permeabilidade a gás nitrogênio	141
FIGURA 4.7	Fragmentos de concreto para ensaio de MEV	145
FIGURA 5.1	Curva granulométrica da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com 3h de moagem	149
FIGURA 5.2	Difratograma de raios X da cinza de biomassa de cana-de-açúcar	151
FIGURA 5.3	Difratograma de raios X da cinza de biomassa após eliminação do pico de maior intensidade de quartzo	151
FIGURA 5.4	Micrografia eletrônica por varredura da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com 3h de moagem com identificação dos pontos de análise por EDS (pontos A, B e C)	152
FIGURA 5.5	Micrografia eletrônica por varredura do metacaulim com identificação do ponto de análise pontual por EDS	154
FIGURA 5.6	Difratograma de raios X do metacaulim	155
FIGURA 5.7	Curvas granulométricas dos agregados leves AE-0500 e AE-1506	157
FIGURA 5.8	Curvas granulométricas das misturas dos agregados leves e curvas granulométricas individuais da AE-0500 e AE-1506 (NBR NM 248, 2003)	159
FIGURA 5.9	Difratograma de raios X da argila AE-0500	161
FIGURA 5.10	Difratograma de raios X da argila AE-1506	161
FIGURA 5.11	Micrografia da estrutura interna da argila AE-0500	162
FIGURA 5.12	Micrografia da estrutura interna da argila AE-1506	162

FIGURA 5.13	Curva e faixa granulométrica do agregado miúdo	164
FIGURA 5.14	Teores de absorção por imersão, porosidade total e índice de vazios, após 28 dias de cura, dos CEL	169
FIGURA 5.15	Ilustração de corpos-de-prova após ensaio de resistência à compressão axial dos concretos CEL: fissuras de ruptura modo colunar (a) e ruptura dos agregados leves (b)	171
FIGURA 5.16	Evolução da resistência à compressão axial (f_c), com relação ao tempo, para os CEL	172
FIGURA 5.17	Relação entre a massa específica real e resistência à compressão axial dos concretos CEL, aos 28 dias de idade	174
FIGURA 5.18	Módulos de elasticidade dinâmico, em função da idade, dos concretos estruturais leves	175
FIGURA 5.19	Medição do diâmetro de espalhamento (<i>slump-flow test</i>)	180
FIGURA 5.20	Ensaio de espalhamento (<i>slump-flow test</i>)	181
FIGURA 5.21	Ensaio de escoamento – Funil V	181
FIGURA 5.22	Ensaio da caixa L (medição da habilidade passante)	182
FIGURA 5.23	Ilustração dos concretos CELA no estado fluido	184
FIGURA 5.24	Absorção por imersão, porosidade total e índice de vazios dos CELA, aos 28 dias	187
FIGURA 5.25	Evolução da absorção de água por capilaridade dos CELA, aos 28 dias	189
FIGURA 5.26	Evolução da resistência à compressão dos concretos CELA	191
FIGURA 5.27	Módulos de elasticidade dinâmico, em função da idade, dos CELA	193
FIGURA 5.28	Difratograma de raios X do concreto CELA 00M-00C	197
FIGURA 5.29	Difratograma de raios X do concreto CELA 05M-05C	198
FIGURA 5.30	Difratograma de raios X do concreto CELA 10M-00C	198
FIGURA 5.31	Difratograma de raios X do concreto CELA 00M-10C	199
FIGURA 5.32	Difratograma de raios X do concreto CELA 00M-20C	199
FIGURA 5.33	Intensidade dos picos de C-S-H ângulo $2\theta = 32,06^\circ$ dos CELA, aos 28 dias	200

FIGURA 5.34	Intensidade dos picos de CH ângulo $2\theta = 34,12^\circ$ dos CELA, aos 28 dias	201
FIGURA 5.35	Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 00M-00C	203
FIGURA 5.36	Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 05M-05C	204
FIGURA 5.37	Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 10M-00C	205
FIGURA 5.38	Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 00M-10C	206
FIGURA 5.39	Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 00M-20C	207
FIGURA 5.40	Micrografia ilustrando o entrelaçamento entre a argamassa cimentícia e o agregado leve	208
FIGURA 5.41	Ilustração dos produtos de hidratação da matriz cimentícia internamente nos poros do agregado leve	208
FIGURA 5.42	Visualização do contorno da zona de transição matriz-agregado	209
FIGURA 5.43	Micrografia ilustrando os vazios capilares na zona de transição (CELA 10M-00C)	210
FIGURA 5.44	Micrografia ilustrando os vazios capilares na zona de transição (CELA 00M-20C)	210

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1	Compostos e abreviações individuais dos óxidos	29
TABELA 2.2	Proporção de óxidos no clínquer de cimento Portland, em porcentagem (TAYLOR, 1990)	29
TABELA 2.3	Principais compostos e suas abreviações	29
TABELA 2.4	Principais compostos do cimento Portland e suas características (MEHTA & MONTEIRO, 2008)	34
TABELA 2.5	Tipos de agregados leves europeus e suas características (OWENS, 2005)	38
TABELA 2.6	Dados de referência da massa específica dos concretos leves (ROSSIGNOLO, 2003)	46
TABELA 2.7	Valores normativos, segundo NM 35 (1995), referentes à resistência à compressão e massa específica aparente para concretos estruturais leves	48
TABELA 2.8	Classificação do concreto leve (NEWMAN, 2005)	49
TABELA 2.9	Consumo de cimento (kg/m ³), aproximado, em relação à resistência à compressão para concretos estruturais leves (ACI 213R-87, 1999)	52
TABELA 2.10	Composição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, em termos de óxidos, determinados por Borja <i>et al.</i> (2010), Cordeiro (2006), Massazza (2004), Goyal <i>et al.</i> (2007) e Martirena Hernández <i>et al.</i> (1998)	67
TABELA 2.11	Características e conseqüências de emprego de adições minerais nas propriedades do CAA (TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008) <i>apud</i> PALARETI (2009))	69
TABELA 2.12	Classes de espalhamento, viscosidade plástica aparente, habilidade passante e resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação (ALENCAR <i>et al.</i> , 2010)	82
TABELA 3.1	Resultados de resistência à compressão e massa específica de concretos leves a partir do trabalho desenvolvido pela <i>British Cement Association</i> , 2002 (CLARKE, 2005)	86
TABELA 3.2	Parâmetros relacionados à propriedade de durabilidade de concretos produzidos com alguns tipos de agregados leves e normais (BEN-OTHTMAN e BUENFELD, 1990)	99

TABELA 3.3	Ensaio para concretos autoadensáveis e propriedades analisadas (HELA e HUBERTOVIÁ, 2005)	102
TABELA 3.4	Resultados dos ensaios do concreto leve autoadensável no estado fresco (MAGHSOUDI e MOHAMAD POUR, 2009)	106
TABELA 4.1	Ensaio realizado nos concretos CEL e CELA	110
TABELA 4.2	Características e propriedades do cimento CP-II Z 32 RS	115
TABELA 4.3	Quantidades de corpos moedores utilizados no processo de moagem (ANJOS, 2009)	118
TABELA 4.4	Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (NBR 7211, 2005)	121
TABELA 4.5	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211, 2005)	122
TABELA 4.6	Características técnica dos aditivos Glenium 51 e Mastermix 360N	123
TABELA 4.7	Valores de <i>slump</i> pretendido em função do elemento estrutural a ser concretado (ACI 211.2-98)	125
TABELA 4.8	Quantidade de água em função da dimensão máxima do agregado e <i>slump</i> pretendido para concreto sem ar incorporado (ACI 211.2-98)	126
TABELA 4.9	Estimativa da relação água-cimento (a/c) em função da resistência à compressão requerida do concreto (ACI 211.2-98)	126
TABELA 4.10	Estimativa do volume do agregado graúdo seco solto, por unidade de volume de concreto (ACI 211.2-98)	127
TABELA 4.11	Estimativa da massa específica do concreto no estado fresco em função do teor de ar incorporado e do fator da massa específica do agregado graúdo (ACI 211.2-98)	128
TABELA 4.12	Quantidades dos materiais, em kg/m ³ , para concreto estrutural leve	129
TABELA 4.13	Procedimentos de mistura dos materiais para produção dos concretos CEL	130
TABELA 4.14	Consumo de materiais, em kg/m ³ , para mistura dos CELA	132
TABELA 4.15	Teores de cimento e adições minerais em substituição ao cimento para concretos CELA	133

TABELA 4.16	Idade e quantidade de amostras ensaiadas	140
TABELA 5.1	Propriedades físicas do cimento Portland CP-II Z 32 RS	147
TABELA 5.2	Composição química do cimento CP-II Z 32 RS	147
TABELA 5.3	Composição potencial de Bogue do cimento CP-II Z 32 RS	148
TABELA 5.4	Propriedades físicas da cinza de biomassa de cana-de-açúcar	148
TABELA 5.5	Principais compostos químicos da cinza de biomassa	149
TABELA 5.6	Propriedades físicas do metacaulim	153
TABELA 5.7	Composição química do metacaulim	153
TABELA 5.8	Propriedades físicas do agregado leve AE-0500	155
TABELA 5.9	Propriedades físicas do agregado leve AE-1506	156
TABELA 5.10	Composição granulométrica dos agregados leves AE-0500 e AE-1506	156
TABELA 5.11	Composição granulométrica das misturas dos agregados leves AE-0500 e AE-1506 (NBR NM 248, 2003)	158
TABELA 5.12	Composição química das argilas AE-0500 e AE-1506	160
TABELA 5.13	Propriedades físicas do agregado miúdo (areia)	163
TABELA 5.14	Análise granulométrica do agregado miúdo (NBR NM 248, 2003)	164
TABELA 5.15	Abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, 1998)	165
TABELA 5.16	Massas específicas dos concretos estruturais leves no estado fresco e seus respectivos coeficientes de variação, em porcentagem (NBR 9833,1987)	167
TABELA 5.17	Evolução das massas específicas dos concretos estruturais leves, condição superfície saturada seca, e seus respectivos coeficientes de variação, em porcentagem (NBR 9778, 2005)	167
TABELA 5.18	Absorção por imersão, porosidade total, índice de vazios e massas específicas, após 28 dias de cura, dos CEL, com	168

seus respectivos desvios padrões expressões em %

TABELA 5.19	Evolução da absorção por capilaridade dos CEL	170
TABELA 5.20	Resistência à compressão axial (f_c) e relações entre as resistências $f_{c, j\text{dias}}/f_{c, 28\text{dias}}$	172
TABELA 5.21	Módulos de elasticidade dinâmico e relações entre os módulos $E_{d, j\text{dias}}/E_{d, 28\text{dias}}$	175
TABELA 5.22	Valores de coeficientes de permeabilidade a gás nitrogênio, em m^2 , observados nos CEL	176
TABELA 5.23	Ensaio de trabalhabilidade dos CELA	179
TABELA 5.24	Massas específicas no estado fresco dos CELA	184
TABELA 5.25	Teor de ar incorporado dos CELA	185
TABELA 5.26	Propriedades físicas dos CELA, após 28 dias de cura, com os respectivos coeficientes de variação (% entre parênteses)	186
TABELA 5.27	Absorção de água por capilaridade dos CELA e ascensão capilar média após 72h	188
TABELA 5.28	Resistência à compressão axial (f_c) dos CELA, relações entre as resistências $f_{c, j\text{dias}}/f_{c, 28\text{dias}}$ e seus respectivos coeficientes de variação	190
TABELA 5.29	Módulos de elasticidade dinâmico e relações entre os módulos $E_{d, j\text{dias}}/E_{d, 28\text{dias}}$	193
TABELA 5.30	Valores de coeficientes de permeabilidade a gás nitrogênio, em m^2 , observados nos CELA	195
TABELA 5.31	Principais elementos observados nos concretos CELA	196

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	Cimento Portland	27
2.1.1	Composição química do cimento Portland	28
2.1.2	Hidratação do cimento Portland	31
2.1.3	Mecanismos de hidratação	32
2.1.4	Silicatos	33
2.1.5	Aluminatos	33
2.2	Agregado leve	35
2.2.1	Processos de fabricação do agregado leve	37
2.2.2	Principais propriedades do agregado leve	39
	a) <u>Forma da partícula, textura superficial e granulometria</u>	39
	b) <u>Massa específica e massa unitária</u>	40
	c) <u>Resistência à compressão</u>	41
	d) <u>Porosidade total, umidade e absorção de água</u>	41
	e) <u>Módulo de deformação</u>	42
2.3	Concreto leve	43
2.4	Concreto estrutural leve	46
2.4.1	Proporcionamento do concreto leve	50
2.4.1.1	<i>Método de dosagem ACI 211.2-98</i>	52
2.4.1.2	<i>Mistura, aplicação e cura do concreto leve</i>	54
2.5	Concreto autoadensável (CAA)	55
2.5.1	Considerações gerais	55
2.5.2	Definição, desenvolvimento e vantagens do CAA	55
2.5.3	Materiais e composições típicas do CAA	60

2.5.4	Adições minerais em CAA	63
2.5.5	Proporcionamento da mistura (dosagem)	70
2.5.6	Ensaio e requisitos do CAA no estado fresco	73
2.5.6.1	<i>Fluidez e escoamento (SF)</i>	74
2.5.6.2	<i>Viscosidade plástica aparente (VF ou VS)</i>	76
2.5.6.3	<i>Habilidade passante (PL ou PJ)</i>	77
2.5.6.4	<i>Resistência à segregação (SR)</i>	79
3	ESTADO DA ARTE	84
3.1	Cura interna	85
3.2	Propriedades físicas e mecânicas do concreto leve	86
3.3	Módulo de elasticidade do concreto leve	88
3.4	Zona de transição	90
3.5	Porosidade e permeabilidade	93
3.6	Concreto leve autoadensável	100
3.7	Estudos recentes sobre concretos leves autoadensáveis	103
4	MATERIAIS E MÉTODOS	108
4.1	Materiais de partida: características	114
4.1.1	Cimento	115
4.1.2	Cinza de biomassa de cana-de-açúcar	116
4.1.3	Metacaulim	119
4.1.4	Agregados graúdos – argila expandida	119
4.1.5	Agregado miúdo – areia natural quartzosa	122
4.1.6	Aditivos	123
4.2	Dosagem e produção dos concretos	124
4.2.1	Dosagem e produção dos concretos estruturais leves (CEL)	124
4.2.2	Dosagem e produção dos concretos estruturais leves autoadensáveis (CELA)	131

4.3	Métodos de ensaios nos concretos	135
4.3.1	Ensaio no estado fresco	135
4.3.1.1	<i>Reologia</i>	135
4.3.1.2	<i>Massa específica</i>	135
4.3.2	Ensaio no estado endurecido	136
4.3.2.1	<i>Absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massas específicas seca, saturada e real</i>	136
4.3.2.2	<i>Absorção por capilaridade</i>	138
4.3.2.3	<i>Resistência à compressão axial (f_c)</i>	139
4.3.2.4	<i>Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)</i>	139
4.3.3	Propriedades de durabilidade	140
4.3.3.1	<i>Permeabilidade a gás nitrogênio</i>	140
4.3.4	Características microestruturais	142
4.3.4.1	<i>Fluorescência (FRX)</i>	142
4.3.4.2	<i>Difração de raios X (DRX)</i>	143
4.3.4.3	<i>Micrografia eletrônica por varredura (MEV)</i>	144
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	147
5.1	Caracterização dos materiais de partida	147
5.1.1	Cimento	147
5.1.2	Cinza de biomassa de cana-de-açúcar	148
5.1.3	Metacaulim	153
5.1.4	Argila Expandida	155
5.1.5	Agregado miúdo – areia natural quartzosa	163
5.2	Concreto estrutural leve (CEL)	165
5.2.1	Propriedades do concreto no estado fresco	165
5.2.1.1	<i>Consistência</i>	165
5.2.1.2	<i>Massa específica</i>	166

5.2.2	Propriedades do concreto no estado endurecido	168
5.2.2.1	<i>Absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massas específicas seca, saturada e real</i>	168
5.2.2.2	<i>Absorção por capilaridade</i>	170
5.2.2.3	<i>Resistência à compressão axial (f_c)</i>	170
5.2.2.4	<i>Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)</i>	174
5.2.3	Propriedades de durabilidade	176
5.2.3.1	<i>Permeabilidade a gás nitrogênio</i>	176
5.2.4	Comparação entre os concretos dosados estudados	177
5.3	Concreto estrutural leve autoadensável (CELA)	179
5.3.1	Propriedades do concreto no estado fresco	179
5.3.1.1	<i>Trabalhabilidade</i>	179
5.3.1.2	<i>Massa específica</i>	184
5.3.1.3	<i>Teor de ar incorporado</i>	185
5.3.2	Propriedades do concreto no estado endurecido	186
5.3.2.1	<i>Absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massas específicas seca, saturada e real</i>	186
5.3.2.2	<i>Absorção por capilaridade</i>	188
5.3.2.3	<i>Resistência à compressão axial (f_c)</i>	188
5.3.2.4	<i>Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)</i>	192
5.3.3	Propriedades de durabilidade	194
5.3.3.1	<i>Permeabilidade a gás nitrogênio</i>	194
5.3.4	Características microestruturais	196
5.3.4.1	<i>Fluorescência (FRX)</i>	196
5.3.4.2	<i>Difração de raios X (DRX)</i>	197
5.3.4.3	<i>Micrografia eletrônica por varredura (MEV)</i>	202
5.3.4.4	<i>Zona de transição</i>	206
6	CONCLUSÕES	211

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

214

REFERÊNCIAS

215

1 INTRODUÇÃO

A mecanização nos processos construtivos como forma de acelerar o processo de produção e, como consequência, a produtividade de estruturas de concreto, principalmente em elementos pré-fabricados, tem incentivado estudos mais aprofundados de estruturas em concreto leve e concreto autoadensável como materiais alternativos ao concreto convencional.

Por apresentar baixa densidade, o uso do concreto estrutural leve reduz o peso próprio dos elementos estruturais, influenciando diretamente na economia da infraestrutura (fundação), adicionando-se também a vantagem de ser um material que apresenta bom desempenho como isolante térmico e acústico (HER-YUNG, 2009). Neville (1997) reforça que o uso de concretos estruturais leves ocasiona numa maior produtividade por pesar menos que o concreto convencional, facilitando o transporte dos materiais durante a etapa de execução da obra.

Esforços para minimizar o peso do edifício é uma tarefa particularmente urgente em aglomerações urbanas, onde a falta espacial de solo com capacidade de resistência o suficiente para suportar as cargas da edificação, vincula os construtores a buscar materiais alternativos com menores massas específicas e que reduzam a transferência de calor e propagação do barulho urbano.

Dentre outras novas tecnologias, tem-se o concreto autoadensável, que está em evidência nos países desenvolvidos e começando a surgir no mercado nacional como um concreto alternativo ao concreto convencional, sendo considerado por muitos pesquisadores como o concreto do futuro. A principal atratividade do seu uso é a facilidade de manuseio e aplicação, cuja habilidade de preencher os espaços existentes nas fôrmas e envolver as armaduras, se dá exclusivamente através da ação da gravidade (peso próprio) (OKAMURA e OUCHI, 2003), sem nenhuma interferência mecânica ou manual.

Ao se trabalhar com concretos mais fluidos, que requerem menos esforços dos operários, tem-se como consequência redução no tempo de manuseio e

também no adensamento quando na aplicação em estruturas de concreto, ocasionando maior produtividade e menor custo final na operação de concretagem.

Em se tratando de concretos autoadensáveis, o princípio mais importante para manter suas características é o uso de aditivos superplastificantes combinados com alto teor de materiais finos (EFNARC, 2002), que resultará em redução da quantidade de água associado a uma maior coesão e compacidade da pasta cimentícia, induzindo aumento na resistência mecânica e durabilidade do concreto.

A adição de materiais super finos na formulação de concretos autoadensáveis pode substituir aditivos viscosificantes, desde que adequadamente dosado. Este tipo de inclusão, além de aumentar a viscosidade da água de amassamento, aumenta a coesão e, deste modo, reduz a segregação do composto final.

Estudos recentes (TUTIKIAN, 2007; CORDEIRO, 2006) vêm utilizando-se de adições minerais em compostos cimentícios por apresentarem capacidade de desenvolver atividade pozolânica associada ao efeito filler. A inclusão destas adições minerais, geralmente oriundas de subprodutos industriais ou agrícolas, também favorece na redução no custo final do material cimentício por substituírem parcialmente o consumo de cimento sem comprometer seu desempenho, podendo ainda apresentar atividade pozolânica, além de uma destinação nobre deste resíduo, contribuindo, assim, na redução do passivo ambiental. Em contrapartida, dada a alta área superficial destas adições minerais versus a alta fluidez necessária para concretos autoadensáveis, faz-se necessário o uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes a fim de maximizar a fluidez sem comprometimento da relação água-cimento.

Desta forma, fica evidente o mérito que se tem em trabalhar conjuntamente com esses dois tipos de concretos, que quando associados entre si, aliam menor massa específica e maior fluidez, denominado de concreto estrutural leve autoadensável, constituindo-se uma linha de estudo moderna do concreto e, ainda, sem conhecimento difundido no meio técnico nacional. Porém, para atingir tal comportamento, o concreto leve autoadensável necessita atender requisitos determinantes, como elevada fluidez, coesão, habilidade passante e resistência à

segregação no estado fresco, resistência à compressão adequada ao seu uso e baixa massa específica seca no estado endurecido.

Neste cenário, o presente trabalho se propõe a desenvolver concretos estruturais leves autoadensáveis avaliando o uso de duas granulometrias de argila expandida, que tem uso consagrado como agregado leve em concretos estruturais, em diferentes proporções, associado à adição de aditivos plastificantes/superplastificantes e adições minerais de metacaulim e cinza de biomassa de cana-de-açúcar.

O uso do metacaulim se justifica pela sua conhecida atividade pozolânica (CARMO e PORTELLA, 2008; OLIVEIRA, 2007; SOUZA, 2003; COLEMAN e PAGE, 1997) e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar por se tratar de resíduo gerado em grandes quantidades em nível nacional e regional e que, dependendo das condições de queima do bagaço em caldeiras como co-gerador de energia e da superfície específica, contribuirá como produto de reatividade pozolânica e refinamento dos poros e, conseqüentemente, aumento da durabilidade do compósito cimentício que estiver inserida (ANJOS, 2009; BORJA *et al.*, 2010).

Deste modo, além da proposição principal de formulação de concretos leves autoadensáveis, de caráter original, os seguintes aspectos são abordados por se tratarem de objetivos secundários inerentes a efetivação do estudo:

- Avaliação da influência no proporcionamento de duas granulometrias de argila expandida no concreto estrutural leve visando identificar o traço de melhor desempenho;
- Adequação do concreto estrutural leve em autoadensável com a inclusão de aditivos e adições minerais através do método de tentativas e erros;
- Avaliação da ação da cinza de biomassa e metacaulim como adições minerais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cimento Portland

O concreto é composto de três componentes básicos: cimento Portland, agregados e água, podendo ser adicionado outros componentes com finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades iniciais, como também desenvolver novas propriedades especiais (KETT, 2010). Dentre estes componentes adicionais, os de uso corrente são: incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega, cinza volantes, pozolanas, microssílica, plastificantes, superplastificantes, entre tantos outros. A escolha conveniente destas adições/aditivos é restrita a experiência dos estudiosos e engenheiros do concreto que lançam mão do seu uso visando objetivos específicos a ser atingido.

Cimento hidráulico ou cimento Portland, cinzas volantes e escória de alto forno consagraram-se como os principais agentes aglomerantes usados em estruturas de concreto na atualidade, após extensos estudos de comprovada eficiência e integridade.

Inicialmente, o cimento era conhecido como cimento pozolânico, que foi usado em Roma há mais de 2000 anos, segundo registros históricos. Até hoje ainda existem estruturas em boas condições feitas com cimento pozolânico. Esses cimentos eram produzidos a partir da mistura de cal e cinzas vulcânicas, encontrada próxima da cidade de *Pozzuoli* (antiga Puteoli do Império Romano), na Itália, o que lhe conferiu a denominação “pozolana” (MASSAZZA, 2004).

O cimento Portland é produzido a partir do aquecimento a altas temperaturas (próximas de 1450° C) da mistura pré-determinada de calcário e argila, ou outros materiais de comprovada reatividade que apresentem na sua composição sílica e cálcio, elementos primários constituintes do cimento Portland (TAYLOR, 1990).

O material argiloso contém na sua composição alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e álcalis. A presença de íons de alumínio, ferro e magnésio na composição

das matérias-primas, além dos álcalis, é de grande importância por apresentarem efeito mineralizante na formação de silicatos de cálcio (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Assim, o clínquer de cimento Portland, produzido após sinterização destes materiais adequadamente proporcionados, é constituído essencialmente por silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio, ferroaluminatos de cálcio e pequenas quantidades de sulfato de cálcio.

A pulverização do clínquer em moinhos de bola, acrescido de aproximadamente 5% de gipsita ou sulfato de cálcio, a fim de viabilizar o controle da hidratação inicial do cimento, gera partículas que variam entre 10 μm a 15 μm finalizando a operação do processo de fabricação do cimento Portland.

2.1.1 Composição química do cimento Portland

O estágio de equilíbrio químico atingido pelas matérias-primas que compõem o cimento Portland na produção do clínquer é obtido através da interação entre seus principais componentes, principalmente o calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, formando uma série de produtos mais complexos. A velocidade de resfriamento desse processo acaba por influenciar o grau de cristalização desses compostos, alterando a quantidade de material amorfo (NEVILLE, 1997).

Resultados de análises químicas de rotina expressam os elementos presentes no cimento em termos de óxidos, tornando difícil obter alguma conclusão com relação às propriedades do cimento. Os compostos individuais dos óxidos são expressos usando abreviações como as apresentadas na tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Compostos e abreviações individuais dos óxidos.

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
SO ₃	Š
H ₂ O	H

Os teores de óxidos básicos (CaO) e óxidos ácidos (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃), de acordo com Taylor (1990), que compõem o clínquer, são mostrados na tabela 2.2.

TABELA 2.2 – Proporção de óxidos no clínquer de cimento Portland, em porcentagem (TAYLOR, 1990).

Óxido	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Outros componentes
Teor (%)	67	22	5	3	3

Usualmente, apenas quatro compostos principais constituintes do cimento são considerados: duas fases de silicatos bem cristalizados, denominados de alita (C₃S – silicato tricálcico) e belita (C₂S – silicato dicálcico), uma fase intersticial composta de C₃A (aluminato tricálcico) e C₄AF (ferro aluminato tetracálcico – ferrita). A estes compostos se associam símbolos abreviados que são comumente usados pelos químicos do cimento, como apresentados na tabela 2.3.

TABELA 2.3 – Principais compostos e suas abreviações.

Nome do Composto	Composição em óxidos	Abreviações
Silicato Tricálcico	3CaO. SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaO. SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Outras fases estão presentes em forma de impurezas em menores quantidades, tais como periclásio (MgO), o óxido de cálcio calcinado endurecido (CaO) e sulfatos alcalinos.

O sulfato de cálcio, adicionado ao clínquer, na produção do cimento, para controle da hidratação inicial do cimento, pode ser encontrado sob a forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemidrato ou bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4), ou uma mistura de dois ou três destes compostos.

Os silicatos dos cimentos não são compostos puros e contém óxidos secundários em pequenos teores em solução sólida, porém têm efeitos significativos nos arranjos atômicos, nas formas cristalinas e nas propriedades hidráulicas dos silicatos.

Para o cálculo dos teores dos compostos é considerado que o cimento resfriado reproduz o mesmo equilíbrio existente à temperatura de clinquerização, determinado a partir das quantidades de óxidos presentes no clínquer como se tivesse ocorrido completa cristalização dos produtos do equilíbrio, e que a presença de impurezas, como MgO e álcalis são ignoradas.

Bogue, como relata Taylor (1990), formulou equações denominadas de “composição potencial do cimento” por oferecerem uma estimativa inicial do teor de compostos do cimento Portland, apresentadas nas equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, a seguir:

$$\%C_3S = 4,071C - 7,600S - 6,718A - 1,430F - 2,850\check{S} \quad (2.1)$$

$$\%C_2S = 2,867S - 0,7544C_3S \quad (2.2)$$

$$\%C_3A = 2,650A - 1,692F \quad (2.3)$$

$$\%C_4AF = 3,043F \quad (2.4)$$

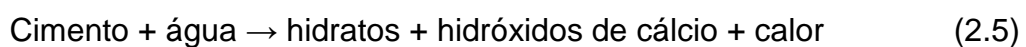
Os termos C, S, A, F e \check{S} , presentes nas equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, representam as porcentagens dos óxidos em relação à massa total do cimento e se aplicam somente aos cimentos Portland para uma relação A/F igual ou maior que 0,64.

Alguns compostos secundários, como MgO, TiO₂, MnO₂, K₂O e Na₂O não são representados por representarem pequena porcentagem da massa do cimento. No entanto, os compostos secundários Na₂O e K₂O, mesmo em pequenas quantidades, chegam a reagir com alguns agregados provocando a desintegração do concreto. Por isso, vários estudos têm se aprofundado no tema relativo à reação álcali-agregado. Constatou-se também que eles influenciam na velocidade de aumento de resistência do cimento, segundo Neville (1997).

2.1.2 Hidratação do cimento Portland

De forma simples, define-se a hidratação do cimento como sendo uma reação que ocorre entre componentes sólidos (cimento) e a fase líquida (água). Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio formado a altas temperaturas começam a entrar em solução, e a fase líquida se torna rapidamente saturada com alguns íons e são denominados de solução de poros. Os principais íons presentes na solução de poros são OH⁻, K⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, Al(OH)₄⁻, H₂SiO₄⁻, entre outros, com os íons de álcalis (K⁺ e Na⁺) e OH⁻, em quantidades normalmente dominantes entre eles.

Devido à complexidade das reações de hidratação, o principal aspecto abordado é a formação de produtos de hidratação, que pode ser ilustrado conforme a equação 2.5.



Basicamente, como reforça Silva (2006), a hidratação do cimento se dá pela hidratação dos seus quatro principais componentes: C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF, com o endurecimento da pasta amplamente dominado pela hidratação dos aluminatos (C₃A e C₄AF) e a resistência do compósito comandada pelos silicatos (C₃S e C₂S), que compõem cerca de 75% do cimento Portland comum.

2.1.3 Mecanismos de hidratação

Conforme relata Mehta e Monteiro (2008), dois mecanismos de hidratação do cimento Portland foram propostos: a *hidratação por dissolução-precipitação* e o *topoquímico* ou *hidratação no estado sólido*. A *hidratação por dissolução-precipitação* trata da dissolução de compostos anidros em seus constituintes atômicos com uma completa reorganização dos constituintes dos compostos originais durante a hidratação do cimento. No outro mecanismo proposto, denominado *topoquímico* ou *hidratação no estado sólido* do cimento, as reações acontecem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro sem que os compostos entrem em solução.

Na figura 2.1 ilustra-se a dominância do mecanismo de *hidratação por dissolução-precipitação* nos estágios iniciais de hidratação do cimento, que ocorrem no período entre 3 e 24 horas, obtida através de microscópio eletrônico de varredura em pastas de cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Ainda com relação a esta figura, observa-se a formação de cristais de hidróxido de cálcio com estrutura cristalina maciça bem definida e os cristais de C-S-H apresenta morfologia fibrosa pouco cristalina.

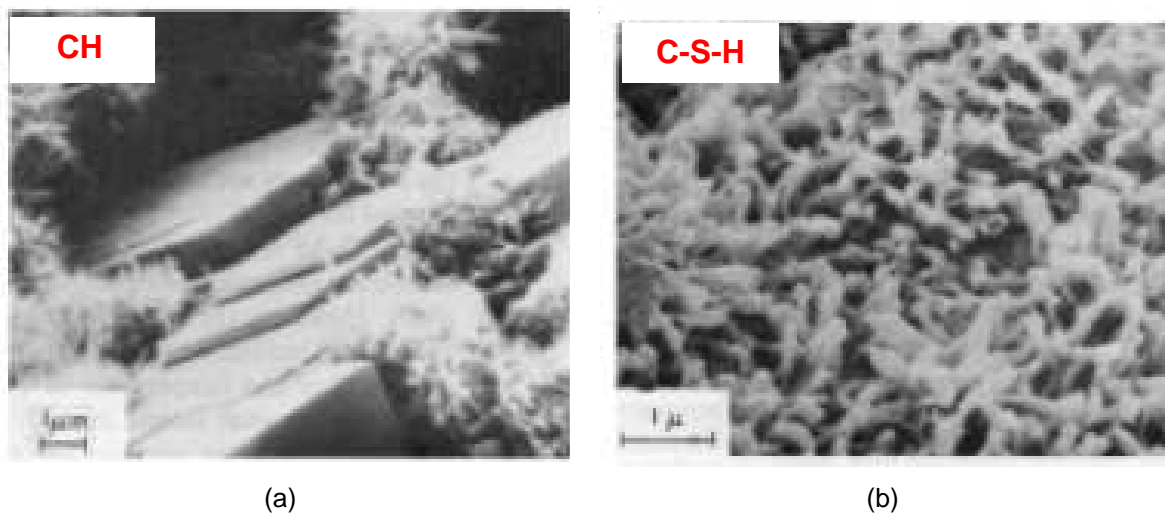


FIGURA 2.1 - Micrografia eletrônica de varredura de pasta de cimento Portland: formação dos cristais de CH (a) e, morfologia fibrosa do C-S-H, com três dias de idade (b) (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

2.1.4 Silicatos

A hidratação dos silicatos (C_3S e C_2S) inicia algumas horas após o início da hidratação do cimento e resultam na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH). A resistência inicial da pasta de cimento Portland e aumento de sua resistência final é comandada pelo C_3S , enquanto que o C_2S é responsável pelo aumento da resistência em idades avançadas.

Em geral, os silicatos de cálcio hidratado são pouco cristalinos e forma um sólido poroso que apresenta características de gel rígido, denominado de *gel de tobermorita* (MEHTA & MONTEIRO, 2008). O hidróxido de cálcio (CH) é conhecido por *portlandita*.

O C-S-H representa de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta hidratada enquanto que o CH constitui de 20% a 25% do volume da mesma pasta. O C-S-H apresenta-se em forma de fibras pouco cristalinas a reticulados cristalinos, e o CH tem morfologia definida em forma de prismas hexagonais.

2.1.5 Aluminatos

A reação de C_3A com água é imediata e provoca a liberação de grande quantidade de calor, aparecendo, em poucos minutos de hidratação do cimento Portland, os primeiros cristais aciculares de sulfoaluminatos de cálcio provenientes da reação do C_3S com o gesso, conhecidos como *etringita* ($C_6AS_3H_{32}$).

Dependendo da proporção alumina-sulfato, a *etringita* pode tornar-se estável e possui a forma de placas hexagonais delgadas.

Em geral, a reatividade do C_4AF é mais lenta do que a do C_3A , porém cresce com o aumento do teor de alumina e diminuição da temperatura resultante da reação de hidratação, exercendo pouca influência na resistência mecânica da pasta.

A tabela 2.4, transcrita de Mehta e Monteiro (2008), apresenta de forma resumida características e propriedades mais importantes dos principais compostos do cimento Portland.

TABELA 2.4 – Principais compostos do cimento Portland e suas características (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Composição aproximada	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\beta 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
Fórmula abreviada	C_3S	$\beta\text{C}_2\text{S}$	C_3A	C_4AF
Nome comum	Alita	Belita	-	Fase Ferrita, F_{ss}
Principais impurezas	MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3	MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3	SiO_2 , MgO , Álcalis	SiO_2 , MgO
Formas cristalinas comuns	Monoclínica	Monoclínica	Cúbica, Otorrômbica	Otorrômbica
Proporção de compostos presentes (%):				
Intervalos de variação	35-65	10-40	0-15	5-15
Média em cimentos comuns	55	20	8	8
Velocidade de reação com água	Rápida	Lenta	Rápida	Moderada
Contribuição para resistência nas primeiras idades	Boa	Pequena	Boa	Boa
Nas últimas idades	Boa	Excelente	Média	Média
Calor de hidratação	Médio	Baixo	Alto	Médio
Típico (cal/g)	120	60	320	100

2.2 Agregado leve

Em geral, segundo a NBR NM 35 (1995), são considerados como agregados leves aqueles que apresentam massas unitárias inferiores a 1120 kg/m^3 . Para o RILEM (1975), qualquer agregado cuja massa específica real das partículas seja inferior a 2000 kg/m^3 ou que possuam massa unitária menor que 1200 kg/m^3 são classificados como agregados leves.

Valores de baixa massa unitária se justificam devido sua microestrutura ser constituída por sistema celular de poros isolados entre si por paredes impermeáveis (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Contudo, para que sejam considerados apropriados para uso em concretos é necessário que seus poros intersticiais estejam encapsulados dentro da estrutura interna da partícula e envoltos por uma camada superficial vítrea. Como ressalta Owens (2005), estas características combinadas não devem aumentar a massa específica do concreto adensado devido à significativa absorção de água ou penetração da pasta de cimento dentro do corpo da partícula do agregado. Na figura 2.2, visualiza-se a estrutura celular porosa interna de agregado leve (argila expandida) em imagem obtida através de microscopia eletrônica de varredura.

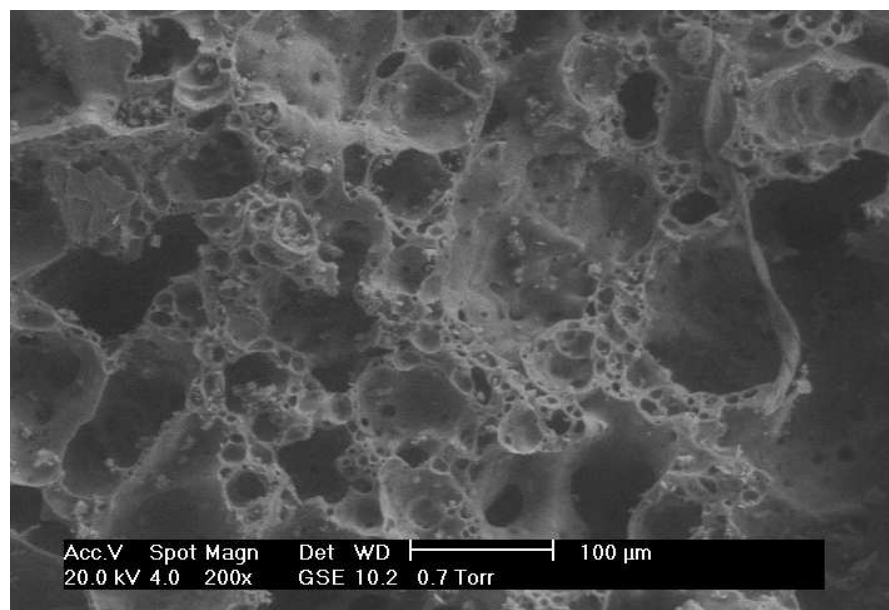


FIGURA 2.2 – Micrografia da estrutura celular porosa interna do agregado leve de argila expandida, obtida por MEV (PEREIRA, 2008).

A estrutura celular interna das partículas é normalmente obtida através de tratamento térmico de certas matérias primas à fusão incipiente. Como exemplos têm-se argilas, folhelhos, vermiculita e ardósia. Nessa temperatura, parte dos gases liberados é incorporada à massa pirolástica viscosa, proveniente da expansão da matéria prima, gerando vazios no seu interior que se mantêm sob refrigeração. A estrutura porosa após o resfriamento reduz a massa unitária do material resultante, que é menor do que antes do tratamento térmico, se tornando adequado o seu uso como agregado graúdo na fabricação de concretos leves (CHANDRA e BERNTSSON, 2002).

Alguns agregados leves são considerados resistentes e duráveis devido à formação da fase vítrea de alta resistência, desenvolvendo um sistema de poros internos distribuídos uniformemente, cujas dimensões variam de 5 µm a 300 µm, relativamente livres de fissuras.

Os agregados leves obtidos pelo processo de forno rotativo apresentam formato arredondado envolto por uma camada vítrea de baixa permeabilidade e de variada granulometria (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2002).

No entanto, o processo de peneiramento, para divisão do agregado em diversas graduações granulométrica, provoca a quebra de alguns desses agregados, expondo parte dos poros internos à superfície.

Os poros expostos à superfície são permeáveis e facilmente preenchidos com água nos primeiros minutos de exposição à umidade. Poros internos, entretanto, absorvem água de forma lenta, sendo necessários maiores tempos de imersão para atingir a saturação. Poros internos são essencialmente não interconectados e permanecem vazios mesmo depois de anos de imersão na água (ACI 213, 2003).

2.2.1 Processos de fabricação do agregado leve

Os agregados leves são classificados segundo sua origem em naturais e artificiais. Os agregados leves naturais são extraídos a partir de depósitos vulcânicos, como por exemplo, pedra-pomes, cinzas vulcânicas e tufa (NEVILLE, 1997). Já os agregados artificiais utilizados na produção de concretos estruturais leves são produzidos em fábricas a partir do tratamento térmico de matérias-primas naturais como xisto, argilas, ardósias, vermiculita, folhelhos ou de subprodutos industriais como cinzas volantes e escórias de alto forno. Segundo Neville (1997) apenas os agregados obtidos por expansão a altas temperaturas como argila, xisto e ardósia podem ser usados em concretos estruturais.

O processo de obtenção através de queima das matérias-primas ocorre em fornos rotativos ou fornos de sinterização.

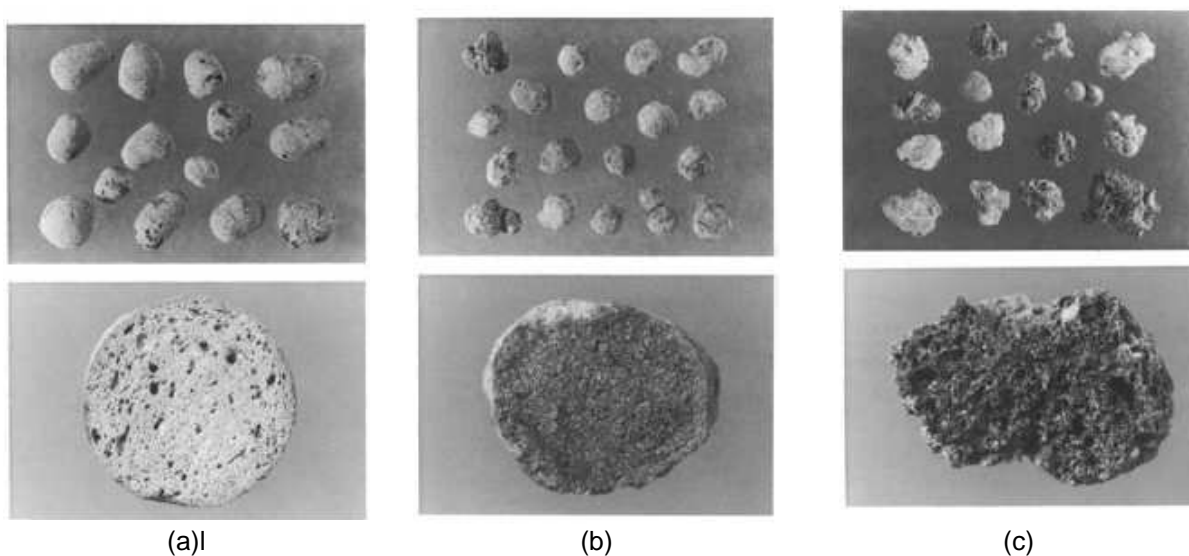
No processo do forno rotativo, o cilindro do forno é revestido por material refratário, similar ao utilizado na produção de cimento Portland, ligeiramente inclinado com longa e lenta rotação, produz partículas esféricas que são recobertas com película protetora impermeável, conferindo maior resistência, melhor trabalhabilidade e menor absorção de água no concreto do que os agregados de poros abertos. A massa unitária desses agregados produzidos em fornos rotativos varia entre 300 kg/m³ e 650 kg/m³ (MORAVIA *et al.*, 2006).

No processo de sinterização, adiciona-se uma proporção adequada de combustível à matéria-prima. Após mistura, este material é depositado em forma não compactada em uma grelha móvel e queimado, fundindo-se superficialmente, formando uma camada ou leito sinterizado, que é depois britado e separado em frações granulométricas adequadas, com massa unitária variando entre 650 kg/m³ a 900 kg/m³.

Os tipos de agregados leves produzidos em fornos rotativos e de sinterização de maior consumo nos países europeus e suas características estão listados na tabela 2.5. Ilustrações de alguns dos principais agregados leves fabricados na Europa e sua seção transversal podem ser visualizadas na figura 2.3.

TABELA 2.5 – Tipos de agregados leves europeus e suas características (OWENS, 2005).

Nome	Tipo	Processo de fabricação	Forma/textura	Massa Unitária (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)
Foamed slag	Escória expandida	<i>Foaming bed</i>	Angular/vesicular	750	< 40
Leca/Fibo	Argila expandida	Forno rotativo	Arredondado/polido	425	< 30
Lytag	Cinza volante sinterizada	Snterização	Arredondado/fino	825	> 40
Pellite	Escória expandida peletizada	Peletização	Irregular/polido	900	> 40
Granulex	Argila expandida	Forno rotativo	Irregular/áspero	700	> 40
Liapor	Xisto expandido	Forno rotativo	Arredondado/polido: fino	650	> 40

**Figura 2.3** – Agregados leves europeus: Leca (a), Litag (b) e Liapor (c) (OWENS, 2005).

2.2.2 Principais propriedades do agregado leve

Cada uma das propriedades do agregado leve pode ter alguma influência sobre as demais propriedades do concreto, quer seja no estado fresco ou no estado endurecido. Deve-se, portanto, identificar quais propriedades do concreto leve, em comum com as do concreto convencional, que são mais fortemente influenciadas pela qualidade da matriz cimentícia.

Dentre as propriedades do agregado que afetam diretamente as propriedades do concreto, o ACI 213 (2003) destaca as seguintes:

- Forma das partículas, textura superficial e granulometria;
- Massa específica e massa unitária;
- Resistência do agregado (carga de ruptura);
- Porosidade total, umidade e absorção de água;
- Módulo de elasticidade.

a) Forma da partícula, textura superficial e granulometria

Agregados leves provenientes de diferentes matérias-primas, ou produzidos por diferentes métodos, podem variar consideravelmente em relação a forma e textura superficial das partículas. A característica geométrica das partículas do agregado diz respeito a sua forma, que pode variar de cúbico, com superfícies regulares, a formas essencialmente arredondadas, ou ainda se apresentar de formas irregulares.

Quanto à textura, pode apresentar superfícies relativamente lisas ou ásperas, com pequenos ou grandes poros expostos. Se comparadas às partículas com superfícies lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera ou com poros expostos necessitam de mais pasta cimentícia para produzir misturas de concreto trabalháveis, ocasionando aumento nos custos.

A forma e a textura superficial das partículas dos agregados leves influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco, em fatores como

trabalhabilidade, bombeabilidade, relação entre agregado miúdo e graúdo e quantidade de água. Estes efeitos são análogos aos obtidos com agregados normais com partículas de formas e texturas diversas.

A granulometria exigida para agregados leves diverge da granulometria dos agregados normais, pois a resistência à compressão, para um dado consumo de água e de cimento, pode ser aumentada ao se reduzir a dimensão máxima do agregado graúdo e/ou substituir parcialmente o agregado miúdo leve por areia natural de boa qualidade (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A norma ASTM C330 reconhece que o aumento da massa específica e resistência do concreto leve normalmente ocorrem com a redução do tamanho da partícula do agregado leve expandido.

Ao se trabalhar com combinações de agregados graúdos leves e agregados miúdos naturais, pode-se obter uma larga variação de massas específicas e resistências para o concreto, principalmente ao se fazer uso de aditivos e adições minerais, recentes tecnologias do concreto.

b) Massa específica e massa unitária

Devido à sua estrutura celular, a massa específica e a massa unitária das partículas do agregado leve são inferiores aos do agregado normal, variando também com o tamanho da partícula, sendo mais elevada para as partículas menores (miúdas) e mais baixas para as partículas graúdas, com a magnitude das diferenças dependendo do método do processo de fabricação.

A variação da massa unitária do agregado leve, na condição seca, é de aproximadamente $1/3$ a $2/3$ com relação ao agregado normal. Massas unitárias abaixo desta variação necessitam maiores quantidades de cimento para atingirem resistência requerida, podendo, assim, deixar de cumprir o requisito de concreto leve (baixa massa específica).

c) Resistência à compressão

A resistência das partículas dos agregados varia com o tipo e origem, e é mensurável apenas na forma qualitativa. Algumas partículas podem ser duras e resistentes e outras frágeis e friáveis.

Como a resistência à compressão do concreto leve é fortemente influenciada pela resistência do agregado, o conceito de carga última (carga de ruptura) do agregado seria mais apropriado na indicação de resistência à compressão e de tração a ser atingida em concretos leves.

Meyer e Kahn (2002), em seus estudos com concretos leves, relataram que, para os concretos que continham o mesmo tipo de agregados e maiores teores de cimento apresentaram resistências ligeiramente superiores, inferindo que o aumento no teor de cimento não conduz a um aumento proporcional na resistência. No entanto, foi observado que a resistência pode ser incrementada, de maneira considerável, ao reduzir o tamanho máximo do agregado graúdo.

d) Porosidade total, umidade e absorção de água

Normalmente, são definidos como poros os espaços vazios (de ar) existentes internamente nas partículas dos agregados e, como vazios, os espaços intersticiais entre as partículas do agregado. Assim, considera-se como porosidade total a soma dos poros (vazios) internos dos agregados e dos espaços intersticiais entre as partículas (OWENS, 2005).

A porcentagem de absorção de água e as características dos poros do agregado leve são parâmetros que devem ser levados em consideração no proporcionamento da mistura, produção e controle do concreto, uma vez que a quantidade de água a ser adicionada não pode ser exclusiva (e necessária) apenas para as reações de hidratação do cimento.

O agregado leve, devido sua estrutura celular porosa, é capaz de absorver mais água do que o agregado normal.

Baseado na norma ASTM C127, testes de absorção, expressos após 24h, os agregados leves geralmente absorvem de 5% a 25%, em massa, o peso do agregado seco, dependendo do sistema de poros do agregado. Em contrapartida, a maioria dos agregados de peso normal absorve menos que 2% de umidade. Um importante fator a ser considerado, dada esta grande diferença de absorção entre os agregados, é que o agregado leve absorve água tanto no interior das partículas como na sua superfície, enquanto que o agregado normal tem absorção concentrada apenas na sua superfície.

e) Módulo de Deformação

O módulo de elasticidade do concreto é função do módulo de seus elementos constituintes. O concreto pode ser considerado com um material de 2-fases, o agregado graúdo e a fração da argamassa cimentícia, que incluem o cimento, água, teor de ar incorporado e agregado miúdo. Assim, quanto maior for o módulo de elasticidade do agregado leve, maior será o valor do módulo do concreto.

Medidas dinâmicas realizadas no agregado isoladamente correlacionam o módulo de elasticidade com a massa específica do agregado leve através da equação 6 (ACI 213, 2003).

$$E_d = 0,008 \cdot \rho^2 \quad (2.6)$$

onde:

E_d é o módulo de elasticidade dinâmico das partículas, em MPa, e,

ρ a massa específica da partícula do agregado, em kg/m³.

Holm e Bremner (1994) argumentam que os agregados leves com baixa resistência mecânica têm pouca participação na transmissão das tensões internas no concreto, deduzindo que quanto maior for a diferença entre os valores do módulo de deformação do agregado e da matriz cimentícia, maior será a diferença entre a resistência à compressão da matriz cimentícia e o concreto.

2.3 Concreto leve

Em construções de concreto armado, a baixa relação resistência-peso do concreto, quando comparado com estruturas metálicas, constitui-se uma grande desvantagem desse material. Esta relação pode ser otimizada quando se reduz a massa específica do concreto ou quando se aumenta a sua resistência. Desde o início do século passado, a redução da massa específica do concreto tem sido obtida, com sucesso, através do uso do concreto leve (MORAVIA, 2007).

O concreto leve surgiu como um produto conseqüente do desenvolvimento da tecnologia em concreto e tem sido utilizado desde o início do século passado para fins estruturais e redução do peso próprio da estrutura, com excelentes resultados (ROSSIGNOLO, 2003).

Os Edifícios Australia Square Tower (Austrália), Park Regis (Austrália), Standart Bank (África do Sul) e o BMW Building (Alemanha) são exemplos de edifícios de múltiplos pavimentos construídos a partir da década de 50. Na figura 2.4 ilustram-se imagens desses edifícios (ROSSIGNOLO, 2003).

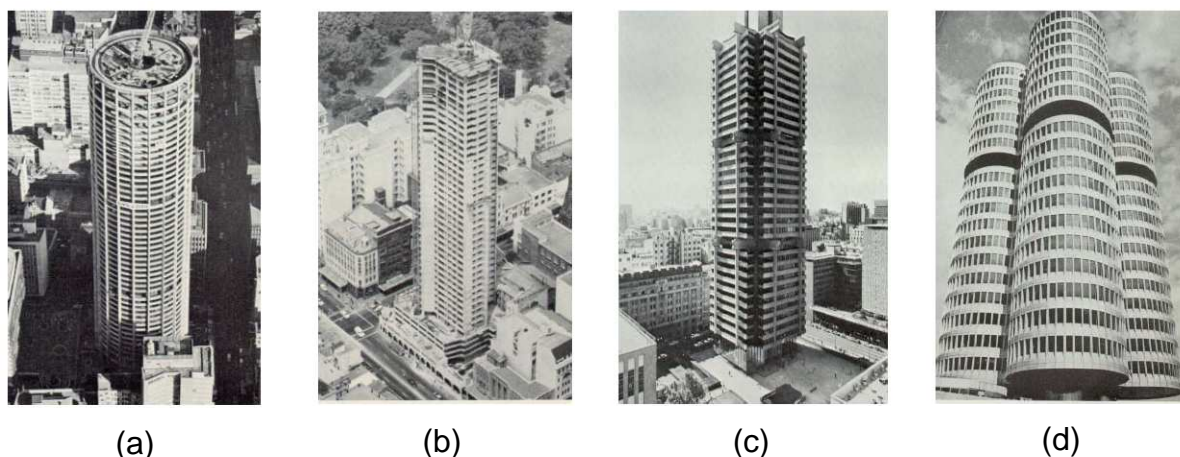


FIGURA 2.4 – Edifícios executados com concreto leve: Square Tower – 1967 (a), Park Regis – 1968 (b), Standart Bank – 1970 (c), BMW Building – 1972 (d) (ROSSIGNOLO, 2003).

Os concretos de agregado leve, também são utilizados em estruturas na forma de peças pré-moldadas, paredes moldadas *in loco* e tabuleiros de pontes com grandes vãos. A figura 2.5 ilustra construções com pré-moldados em concreto leve executadas na Rússia e na Áustria.

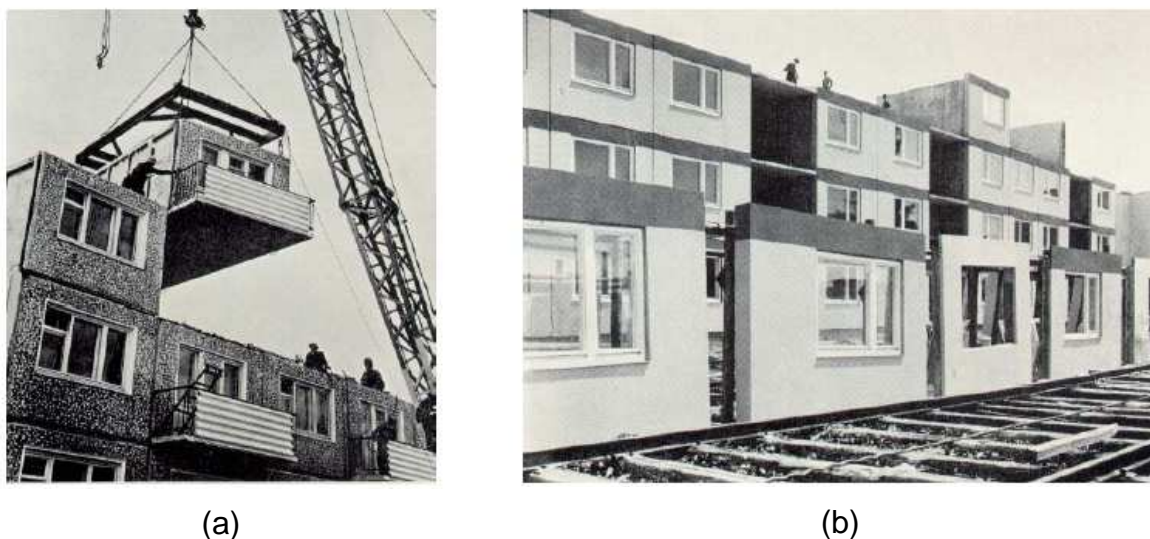


FIGURA 2.5 – Construções com pré-fabricados em concreto leve: Rússia – 1967 (a) e Áustria – 1968 (b) (ROSSIGNOLO, 2003).

Documentos normativos internacionais (RILEM, 1975; CEB-FIP, 1977 e NS 3473, 1992) defendem que será considerado concreto leve aquele que simplesmente apresentar massa específica inferior a 2000 kg/m^3 . Para Newman (2005), concreto com massa específica variando entre 300 kg/m^3 e 2000 kg/m^3 , resistência à compressão em amostras cúbicas variando de 1 MPa a 60 MPa e condutividade térmica de $0,2 \text{ W/mK}$ a $1,0 \text{ W/mK}$, são definidos como concretos leves. Para análise comparativa, tem-se o concreto convencional que apresenta massa específica entre $2100 - 2500 \text{ kg/m}^3$, resistência à compressão, também em amostras cúbicas, entre 15 MPa e 100 MPa e condutividade térmica variando de $1,6 \text{ W/mK}$ a $1,9 \text{ W/mK}$.

Há muitos modos para produzir concreto de peso leve. Destes, podem ser identificados três tipos principais.

- ✓ O primeiro tipo é o concreto com agregado leve, utilizado em estruturas monolíticas, e têm a substituição parcial ou total do agregado normal pelo agregado leve, podendo ser usado como concreto estrutural e não estrutural. No último caso, tem a função apenas de vedação ou como concreto para isolamento térmica. Segundo Neville (1997), são os únicos concretos leves que podem, dependendo do tipo de agregado, traço e dosagem, atingir resistências aceitáveis para fins estruturais;

✓ O segundo tipo de concreto leve é produzido com a introdução de grandes quantidades de vazios dentro da argamassa cimentícia, resultante da ação de produtos, e é conhecido como concreto aerado, espumoso ou concreto com gás. Maycá *et al.* (2009), ressalta que embora aceita e bastante usual, esta denominação pode ser questionada, uma vez que o material resultante não seja propriamente um concreto, e sim uma argamassa, tendo uso apenas como material de enchimento ou em componentes de alvenaria, muito embora existam registros de agregados leves inseridos à este tipo de concreto;

✓ O terceiro tipo de concreto leve é denominado de concreto de baixa densidade, que se utiliza apenas de agregados graúdos leves, o que ocasiona um grande número de vazios intersticiais, também denominado de concreto “sem finos” (CHANDRA e BERNTSSON, 2002). Pode ser usado para confecções de painéis divisórios.

Como ressalta Moravia (2007), todos os tipos de concretos leves têm na sua essência a redução da massa específica, podendo novos concretos ser obtidos com a combinação desses três tipos. A figura 2.6 ilustra, esquematicamente, os três tipos de concreto leve.

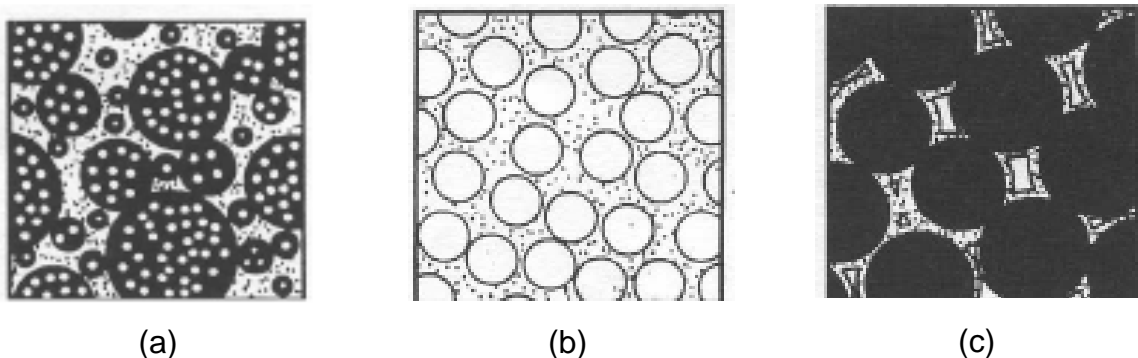


FIGURA 2.6 – Os três tipos de concreto leve: concreto com agregado leve (a), concreto aerado (b) e concreto sem finos (c) (MORAVIA, 2007).

2.4 Concreto estrutural leve

A classificação dos concretos, quanto ao seu peso, em leves, normais ou pesados, é norteado pela massa específica dos agregados usados na sua fabricação. A massa específica dos concretos normais, segundo Neville (1997), varia entre 2200 kg/m³ e 2600 kg/m³, e o concreto leve, segundo Mehta e Monteiro (2008), tem massa específica variando entre 800 kg/m³ e 1850 kg/m³.

A tabela 2.6 apresenta os valores limites de massa específica aparente citados em alguns documentos normativos ou de referência para os concretos leves.

TABELA 2.6 - Dados de referência da massa específica dos concretos leves (ROSSIGNOLO, 2003).

Referência	Massa específica (kg/m ³)
RILEM (1975)	$\gamma < 2000$
CEB-FIP (1977)	$\gamma < 2000$
NS 3473 E (1992)	$1200 < \gamma < 2200$
ACI 213R-87 (1997)	$1400 < \gamma < 1850$
CEN prEN 205-25 (1999)	$800 < \gamma < 2000$

Nos concretos leves é comum correlacionar a massa específica com a resistência à compressão. Concretos com baixas massas específicas têm baixa resistência e concretos com elevadas massas específicas, freqüentemente, têm alta resistência mecânica. Concretos leves, segundo Chandra e Berntsson (2002), geralmente, têm resistência à compressão variando de 10 a 70 MPa.

Na figura 2.7 (MEHTA & MONTEIRO, 2008), ilustra-se um amplo espectro de agregados leves relacionando suas massas unitárias com suas possibilidades de aplicações quando inseridos como agregados em concretos leves. Na extremidade esquerda do espectro estão os agregados mais porosos, adequados apenas para a produção de concretos isolantes não estruturais. Na extremidade oposta estão localizados os agregados leves de maiores massas unitárias do espectro, adequados para a produção de concreto estrutural.

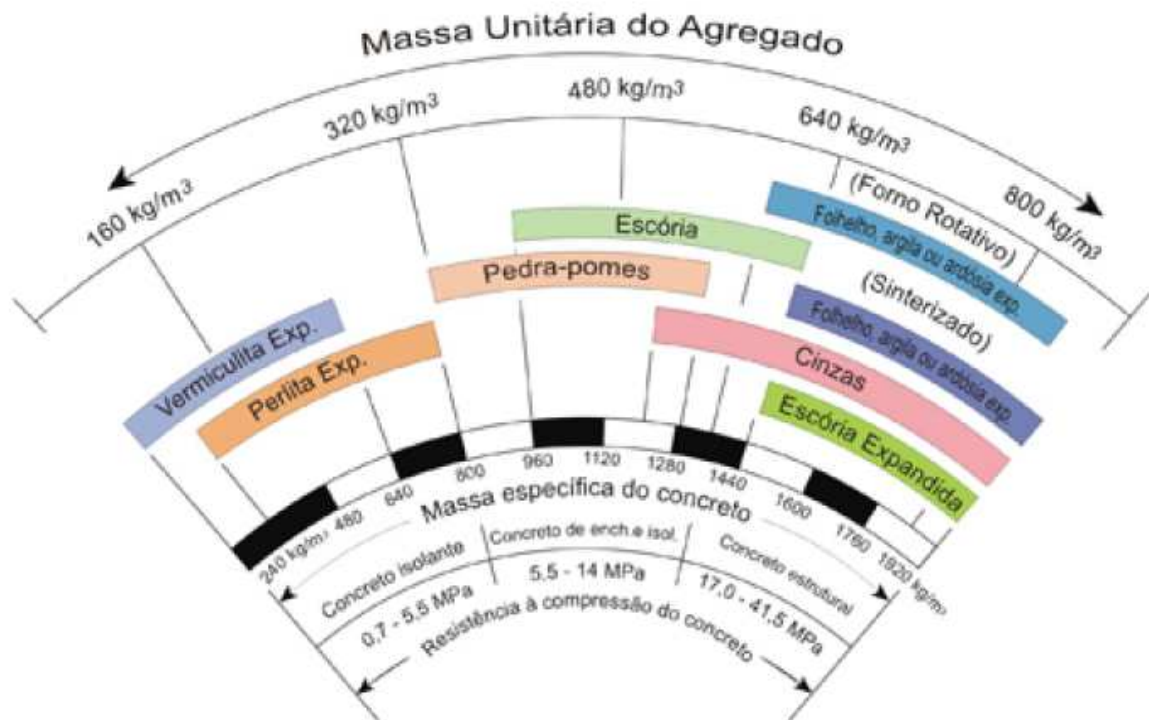


FIGURA 2.7 – Espectro dos agregados leves (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A massa específica do concreto no estado endurecido é influenciada pela massa específica dos seus constituintes e pelas proporções da mistura.

A granulometria e a forma dos grãos também podem influenciar, proporcionando uma melhor distribuição das partículas.

A norma brasileira NBR NM 35 (ABNT, 1995) especifica que os agregados miúdos leves, quando empregados na produção de concretos leves, não devem apresentar massa unitária no estado solto acima de 1120 kg/m³, e 880 kg/m³ para os agregados graúdos, estabelecendo uma relação entre a resistência à compressão mínima e massa específica máxima para concretos estruturais leves, como apresentado na tabela 2.7.

TABELA 2.7 – Valores normativos, segundo NM 35 (1995), referentes à resistência à compressão e massa específica aparente para concretos estruturais leves.

Resistência à compressão, aos 28 dias (MPa)	Massa específica aparente (kg/m ³)
≥ 28	≤ 1840
≥ 21	≤ 1760
≥ 17	≤ 1680

Para Clarke (2005), concreto estrutural leve é um concreto estrutural em todos os sentidos, exceto que o concreto é feito com agregados leves, com massa específica seca aproximadamente igual a dois terços da massa específica do concreto convencional, que se utiliza de agregados naturais.

A utilização de concreto estrutural leve é indicada quando se tem solos com baixa capacidade de suporte e também em locais com elevadas aglomerações de edificações, cuja necessidade de material que apresente bom desempenho como isolante térmico e acústico se faz sobrepujante.

Para que o concreto seja classificado como concreto estrutural leve, as especificações de normas limitam a sua massa específica aparente e exigem resistência à compressão mínima, aos 28 dias, para assegurar a qualidade do concreto (MORAVIA, 2007).

As propriedades do concreto leve podem ser exploradas sob diversas formas, desde o seu uso como material estrutural secundário (enchimento) até a incorporação em estruturas portantes, inclusive visando benefícios no isolamento térmico. Estas variedades são reconhecidas pelo RILEM/CEB, como transcreve Newman (2005), e classificadas de acordo com o exposto na tabela 2.8.

TABELA 2.8 – Classificação do concreto leve (NEWMAN, 2005).

Propriedades	Classes e Tipos		
	I	II	III
	Estrutural	Estrutural / Isolante	Isolante
Resistência à compressão (MPa)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Coefficiente de condutividade Térmica (W/mK)	-	< 0,75	< 0,30
Massa Específica (kg/m ³)	1600 - 2000	< 1600	<< 1450

O agregado leve, por possuir estrutura porosa, tende a reduzir bastante o desempenho estrutural do concreto, limitando a sua resistência a patamares relativamente baixos em comparação ao concreto convencional. Deste modo, o concreto estrutural leve pode conter na sua composição apenas agregados leves, ou, por outras razões diversas, uma combinação de agregados leves e normais (NEWMAN, 2005).

Alguns agregados leves são encontrados ao natural, outros são produzidos a partir de materiais naturais ou de subprodutos industriais. A maioria dos agregados leves naturais tem origem vulcânica, como a pedra-pomes, a escória, as cinzas vulcânicas e os tufos. Por outro lado, os agregados leves industrializados podem ser fabricados por tratamento térmico de uma variedade de materiais naturais.

Para concreto estrutural, os principais agregados leves fabricados a partir de materiais naturais são: a argila expandida, utilizada neste estudo, e a ardósia expandida.

Na figura 2.8 (NEVILLE, 1997) ilustra-se a classificação estrutural dos concretos leves e suas massas específicas secas inerentes a utilização de cada tipo de agregado.

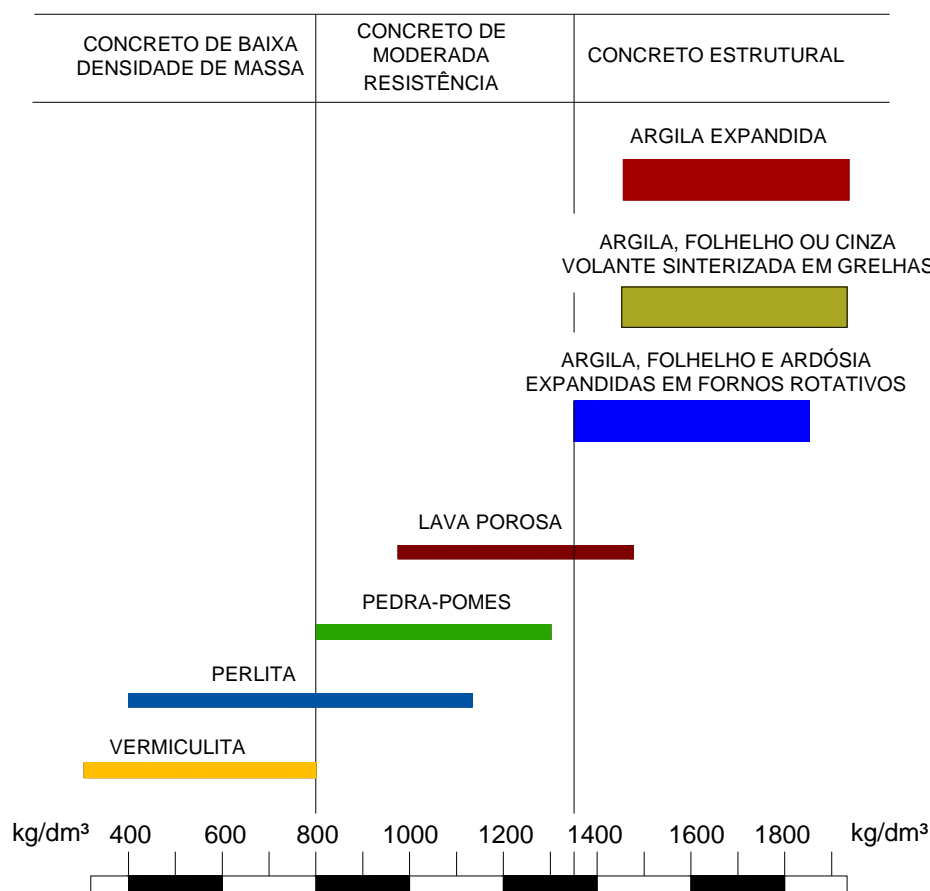


FIGURA 2.8 – Classificação dos concretos leves e suas massas específicas secas (NEVILLE, 1997).

2.4.1 Proporcionamento do concreto leve

Petrucci (1982) recomenda que a dosagem dos concretos leves pode ser executada como a dos concretos com agregados convencionais e que apresentam as mesmas particularidades de manuseio, contudo, ressalta os seguintes fatos a serem observados:

- A resistência à tração é geralmente inferior à dos concretos convencionais;
- A limitação da resistência do concreto é dada pela resistência do agregado. A lei de ABRAMS, que correlaciona a resistência à compressão com a relação água-cimento pode ser adotada, mas limitada pelas características do agregado leve;

- As operações de fabricação (mistura, lançamento e adensamento) do concreto tornam-se mais fáceis realizar, porém maiores cuidados devem ser adotados motivados pela facilidade de segregação devido à baixa massa específica dos agregados;
- Na dosagem, deve-se procurar obter um concreto trabalhável quando fresco e com resistência adequada ao projeto depois de endurecido, mas com massa específica aparente inferior ao concreto convencional.

Outro ponto que deve ser observado é a quantidade de água, que por ser o principal fator de influência sobre a consistência de uma massa de concreto, também é afetada pelo consumo de agregado, consumo de cimento, relação água/cimento, relação agregado/cimento, adições e aditivos, além da forma e a granulometria dos agregados, que influenciam a fluidez do concreto. Em se tratando de agregados leves, esta trabalhabilidade é afetada, além dos fatores acima citados, pelo alto teor de absorção de água do agregado, sendo imperativo o seu pré-umedecimento antes da mistura do concreto (ROSSIGNOLO, 2003; MORAVIA, 2007).

Os procedimentos metodológicos utilizados para dosagem dos concretos leves devem ter atenção especial dado às características intrínsecas do concreto leve, que são: a baixa massa específica do concreto e o elevado teor de absorção de água dos agregados leves.

Análise comparativa direta entre as diversas metodologias de dosagem adotadas pelas normas internacionais é uma tarefa de difícil realização, porque elas incluem diferentes parâmetros, que nem sempre são expressos de forma clara nas suas proposições e equações. Como exemplo, pode-se citar a resistência à compressão, que são especificadas em algumas normas através de ensaios em amostras cúbicas e outras em amostras cilíndricas.

A resistência à compressão de concretos com agregados leves está relacionada com o teor de cimento para um dado abatimento, e não com o fator água/cimento.

Maiores resistência podem ser atingidas, para um dado teor de cimento e de água, quando se utiliza agregados graúdos de menores dimensões e ou

substituindo-se o agregado miúdo leve por areia natural, como afirmam Mehta e Monteiro (2008). Porém, o aumento da resistência do concreto fica limitado à condição inerente do agregado leve, que tem resistência mecânica baixa, mesmo para elevado teores de cimento.

O ACI 213R-87 (1999) apresenta uma relação aproximada entre a resistência à compressão média e o teor de cimento, conforme tabela 2.9.

TABELA 2.9 – Consumo de cimento (kg/m^3), aproximado, em relação à resistência à compressão para concretos estruturais leves (ACI 213R-87, 1999).

Resistência à compressão, aos 28 dias (MPa)	Consumo de Cimento (kg/m^3)	
	Somente Agregados Leves	Agregado graúdo leve e areia natural
17,2	240-305	240-305
20,7	260-335	250-335
27,6	320-395	290-395
34,5	375-450	360-450
41,4	440-550	420-500

2.4.1.1 Método de dosagem ACI 211.2-98

A utilização do método para dosagem de concreto leve preconizado pelo ACI requer prévio conhecimento da taxa de absorção de água, do teor de umidade, do fator de massa específica do agregado leve e ainda de uma estimativa do ar aprisionado (não intencional) à mistura.

A taxa de absorção do agregado leve é bastante elevada e dependente da porosidade total e conectividade entre os poros, bem como das características da superfície do agregado, podendo esta absorção prolongar-se por períodos muito longos, chegando a atingir patamares próximos de 20%, dependendo do tipo de agregado.

Em se tratando de concretos bombeáveis, por estar submetido a grandes pressões (100 atm a 120 atm), a absorção de água pode ser bem mais elevada que 20%, podendo até dobrar este valor, levando a uma descaracterização do traço por perda excessiva de plasticidade e a um aumento da massa específica total do concreto ocasionado pela água que passa a ocupar os poros internos do agregado.

Assim, para agregados leves com altos teores de absorção de água, o método do ACI recomenda que os agregados sejam pré-saturados antes da mistura, levando em consideração a taxa de absorção determinada após um dia de imersão em água, e que, esta quantidade de água absorvida não seja computada na determinação da relação água-materiais cimentícios, nem na determinação do tempo de pega.

O pré-umedecimento dos agregados leves favorece benignamente o processo de endurecimento do cimento (cura interna), principalmente para condições ambiente desfavoráveis e métodos de cura inadequados. Esta prática é aconselhável por promover, de forma benéfica, a liberação lenta da umidade interna presente nos agregados e reduzir, significativamente, a transferência da água presente na argamassa cimentícia para o agregado, que em geral, causa redução da consistência e prejudica todas as operações envolvidas na produção das estruturas em concreto leve, mesmo resultando em acréscimo da massa específica aparente do concreto no estado fresco.

Outro efeito favorável desta alta absorção de água é a melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia através da redução do efeito parede. Contudo, alguns aspectos desfavoráveis são observados no concreto leve no estado endurecido, como o aumento da retração por secagem e aumento da massa específica.

Como forma de promover uma cura interna satisfatória em concretos leves com agregados com elevado teor de absorção de água, é a combinação de agregados graúdos leves com agregados miúdos naturais, principalmente em concretos contendo um alto volume de materiais cimentícios, uma vez que estes tipos de concreto são vulneráveis ao surgimento de fissuras de retração provocadas pelo processo inicial de endurecimento do cimento.

2.4.1.2 *Mistura, aplicação e cura do concreto leve*

O concreto leve tem suas particularidades de manuseio em razão da facilidade de segregação do agregado leve, fato este que deve ser considerado no processo de transporte, aplicação, adensamento e acabamento, uma vez que os equipamentos utilizados são os mesmos empregados para o concreto convencional, tornando-se imperativo uma mão-de-obra qualificada. Os princípios básicos para assegurar um bom desempenho do concreto leve, também aplicáveis a qualquer outro tipo de concreto, são:

- a) Otimização da dosagem, de modo a tornar a mistura trabalhável e que use a quantidade mínima de água de amassamento;
- b) Equipamento adequado para transporte do concreto pronto;
- c) Propriedade de se consolidar nas fôrmas após adensamento sem provocar segregação e exsudação; e,
- d) Mão-de-obra qualificada.

Concretos estruturais leves bem dosados podem ser aplicados e adensados com menos esforços físicos do que o requerido em concretos convencionais. Mehta e Monteiro (2008) citam que o alto abatimento e a vibração excessiva, em concretos com agregado leve, podem proporcionar sedimentação da argamassa, por ser mais pesada que o agregado, ficando em falta na superfície. Esse fenômeno é denominado de segregação do agregado graúdo e é o inverso do que ocorre com o agregado convencional, onde a segregação resulta num excesso de argamassa na superfície.

Os procedimentos de acabamento e processos de cura são similares aos aplicados nos concretos convencionais, porém devem ser iniciados o mais breve possível.

2.5 Concreto autoadensável (CAA)

2.5.1 Considerações gerais

Desde o advento do concreto moderno, em meados do século XIX até o início dos anos 80, esse material permaneceu como uma mistura de cimento, agregados e água, sem muitas inovações que pudessem melhorar substancialmente a composição e suas propriedades. No entanto, em décadas recentes, com o desenvolvimento da tecnologia, o concreto tem passado por grandes modificações em função da evolução das técnicas, novos materiais (aditivos e adições) e equipamentos. Isto possibilitou estudos mais acurados de sua microestrutura e em especial, a interface entre a matriz e o agregado. O uso de novos materiais na composição do concreto também integra a gama de incrementos realizados em termos de concretos especiais. Inovações ocorrem, em geral, pelo fato de pesquisas terem sido desenvolvidas de modo a embasar suas aplicações sob o ponto de vista da engenharia.

Dentre os concretos especiais que alia novas tecnologias com a inclusão de novos materiais e técnicas, tem-se o concreto autoadensável, que está em grande evidência e considerado por muitos pesquisadores como o concreto do futuro.

2.5.2 Definição, desenvolvimento e vantagens do CAA

Em 1983, o professor Okamura, da Universidade de Tóquio, começou a investigar os crescentes problemas relacionados com a durabilidade das estruturas em concreto com elevada taxa de armadura, uma vez que o mercado apresentava carência de mão-de-obra qualificada e de equipamentos adequados para atender às exigências deste tipo de estrutura, concluindo que uma das principais causas do fraco desempenho da durabilidade devia-se ao adensamento impróprio do concreto.

Ainda na década de 80, o professor Okamura propôs o conceito de um concreto de alta durabilidade que não requeresse adensamento para atingir plena compactação, com seu primeiro protótipo de concreto autoadensável em 1988 (OKAMURA e OUCHI, 1999). Ainda segundo estes autores, a primeira aplicação de

CAA no Japão foi no ano de 1990 na execução de um edifício e, a partir daí, o CAA foi aplicado em diversas estruturas.

A ponte Akashi-Kaikyo, construção iniciada em 1988 e inaugurada em 1998, teve como motivação o uso do CAA dado as elevadas taxas de armadura em seus blocos de ancoragem. A figura 2.9 (WATANABE, 2008) mostra a vista lateral da ponte e o bloco de ancoragem.

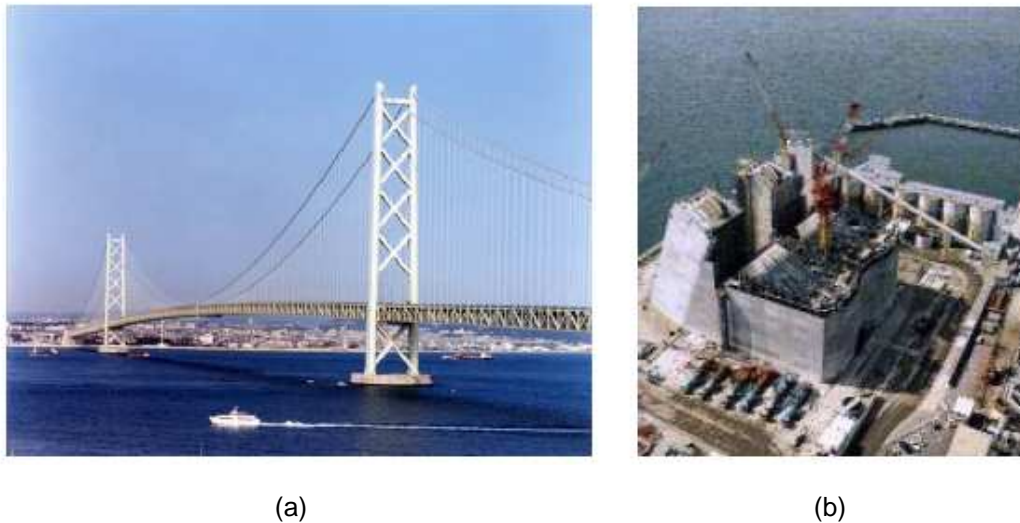


FIGURA 2.9 – Vista lateral da Ponte Akashi-Kaikyo (a) e bloco de ancoragem (b) (WATANABE, 2008).

Em 1998, foi executada em CAA a fachada do Teatro Nacional no Hague, segundo Walraven (2005) *apud* Tutikian (2007), cujo concreto possuía elevada fluidez e baixa viscosidade, conforme ilustra a figura 2.10.



FIGURA 2.10 – Fachada em CAA do Teatro Nacional no Hague (WALRAVEN, 2005 *apud* TUTIKIAN, 2007).

Na figura 2.11 ilustra-se imagem da ponte estaiada Shin-kiba, executada em CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003).



FIGURA 2.11 – Ponte Shin-kiba Ohashi executada no Japão em CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003).

O concreto autoadensável, por ser considerado como um material relativamente novo, a indústria, bem como a comunidade científica, ainda está aprendendo e estudando exaustivamente este tipo de concreto.

Diferentes definições têm sido utilizadas nos últimos anos para descrever o concreto autoadensável. Inicialmente denominado de concreto de alto desempenho (*high performance concrete*), o concreto autoadensável é, sobretudo, um material fluido, muito embora sua real definição extrapole tal característica.

Com parâmetros reológicos que se diferem da maioria dos parâmetros do concreto convencional, o concreto autoadensável se caracteriza por ter comportamento singular, devendo atender, segundo o EFNARC (2002), a três requisitos determinantes:

- ✓ Habilidade de preenchimento (*filling ability*) – definido pela habilidade de preencher completamente todas as áreas e cantos da forma em que for lançado, valendo-se apenas do seu peso próprio (ação da gravidade), dispensando compactação ou vibração, mesmo em situações em que o espaçamento entre as barras de aço das armaduras seja estreito;
- ✓ Habilidade passante (*passing ability*) – manter homogeneidade adequada durante e após a aplicação, mesmo em áreas congestionadas com armaduras (restrições), sem separação dos seus constituintes;
- ✓ Resistência à segregação (*segregation resistance*) – refere-se à habilidade de reter o agregado graúdo da mistura em suspensão, mantendo a mistura sempre como um material uniforme.

Para manter essas características, especialmente após a aplicação, sua homogeneidade depende, principalmente, da viscosidade plástica e da tensão de escoamento, determinadas pelo proporcionamento da mistura, pelo tipo e teor do aditivo superplastificante, pelo teor de finos e pela distribuição granulométrica dos materiais. A viscosidade plástica está relacionada com a tensão de escoamento, que quando atinge valores muito pequenos ou próximos de zero faz com que o CAA apresente elevada fluidez. Contudo, viscosidades muito baixas podem propiciar instabilidade na mistura e ocasionar a segregação, ao mesmo tempo em que valores elevados de viscosidade podem prejudicar a capacidade de preenchimento. O parâmetro de tensão de escoamento está relacionado com o abatimento

(espalhamento), de modo que quanto maior a tensão de escoamento, menor a fluidez e vice-versa (SANTOS e SILVA, 2009). Assim, deve-se procurar dosar concretos autoadensáveis com viscosidades menores, desde que não apresente segregação.

Repetto (2008) reforça a necessidade de maior atenção quando na definição do traço, uma vez que é imprescindível obter fluidez e deformabilidade, evitar qualquer segregação e adequar custos, recomendando o ajuste do traço em laboratório a partir da pasta, seguido da adequação da argamassa e, por fim, do concreto. Estes cuidados se tornam imprescindíveis devido à redução do tempo de manuseio em relação ao concreto convencional, pois perde plasticidade muito rapidamente. Com efeito, a esta problemática, soma-se o custo ainda elevado, o que tem ocasionado a existência de poucas obras que se utilizam dessa tecnologia e assim, construtoras e engenheiros ficam receosos da sua utilização, contribuindo para um grupo resumido de conhecedores dessa inovação.

No entanto, não se pode estimar apenas os custos relativos à produção do concreto, mas todos os custos envolvidos na etapa de concretagem, o que acaba favorecendo o seu uso por envolver a redução de custos decorrentes do menor número de funcionários envolvidos na sua aplicação, eliminação de consumo de energia elétrica, aumento das possibilidades de trabalho com fôrmas estreitas e taxas de armadura elevadas e, desta forma, atender as exigências dos recobrimentos mínimos determinados pela norma NBR 6118 (2003). A todas estas características soma-se a durabilidade do CAA, uma vez que esta é uma variação do concreto de alto desempenho.

Muitos insucessos na aplicação do CAA relacionam-se à elevada segregação do material, o que acaba por induzir a exsudação da mistura e, conseqüentemente, a separação da água da mistura e afundamento dos agregados, provocando perda de resistência na superfície superior e até mesmo a exposição das armaduras.

Tutikian (2004) relata que os principais motivos para a exsudação é a falta de ajuste do traço e o excesso de aditivo superplastificante, com possibilidade de manifestações patológicas, afetando a capacidade do CAA de se mover adequadamente e a heterogeneidade das propriedades mecânicas.

É evidente a grande vantagem que se tem em trabalhar com materiais mais fluidos, uma vez que requer menos esforços dos operários e como consequência, ganho no tempo de manuseio e adensamento, ocasionando maior produtividade e menor custo final na operação de concretagem.

Bernabeu (2000) enfatiza que o uso de concreto autoadensável é economicamente viável em situações específicas, citando como exemplo quando há dificuldade para adensamento ou vibração do concreto ou a presença de armaduras muito densas nos elementos estruturais, tornando-se assim bastante atrativo o seu emprego.

2.5.3 Materiais e composições típicas do CAA

Em princípio, todos os materiais usados na fabricação do concreto convencional podem ser utilizados na produção do CAA. Sua característica singular, no estado fresco, é que o diferencia do concreto convencional, muito embora obtido com os mesmos materiais, porém com maior adição de finos, de aditivos superplastificantes e, eventualmente, moderador de viscosidade. Santos e Silva (2009) reforçam a necessidade de maior teor de finos passante na peneira de 200 *mesh* (75 μm) e restrições quanto a utilização de agregados graúdos superiores a 19 mm e um maior teor de argamassa.

Os aditivos superplastificantes mais indicados são os chamados aditivos de 3ª geração à base de éteres policarboxílicos que permitem produzir concretos com alta fluidez e baixa relação água/cimento (SOUZA, 2003). Aditivos modificadores de viscosidade e/ou as adições minerais são utilizadas na composição do CAA objetivando fluidez (habilidade passante) e boa coesão da mistura (resistência à segregação).

A adição de materiais finos também serve para aumentar a resistência mecânica do concreto e torná-lo mais impermeável, prolongando sua vida útil (durabilidade), influenciando positivamente nas propriedades do concreto pelo efeito filler, que é o aumento da densidade da mistura pelo preenchimento dos espaços vazios do concreto por suas dimensões de partículas reduzidas.

Por outro lado, o elevado teor de argamassa pode aumentar consideravelmente o custo do concreto e ocasionar fissuras decorrentes da retração por secagem. O aumento das fissuras de retração por secagem está associado ao elevado teor do cimento somado ao baixo consumo de agregados graúdos que promovem elevado calor de hidratação.

Com relação ao cimento, recomenda-se o uso de cimentos com maior área superficial, embora não exista nenhum critério cimentício que especifique esse material. Porém, Tutikian (2004) esclarece que é de fundamental importância conhecer o tipo de cimento a ser usado no que diz respeito à quantidade de água e trabalhabilidade da mistura, pois o controle da quantidade de aluminato tricálcico e a granulometria do cimento são importantes para a determinação do seu comportamento e fluxo, uma vez que quanto menor for a quantidade de aluminato tricálcico, melhor será para controlá-lo e mais longo será o seu endurecimento. O mesmo autor recomenda não utilizar cimento com mais de 10% de aluminato tricálcico na fabricação de CAA, pois dificulta sua aplicação em razão da redução de fluidez ocasionado pelo aumento da velocidade de endurecimento.

Tutikian e Dal Molin, segundo Palareti (2009), apontam que agregados miúdos com partículas de formato arredondados e lisos produzem concretos mais fluidos para um mesmo fator a/c . Em contrapartida, areias muito grossa podem provocar segregação.

Na figura 2.12 ilustra-se, de modo simbólico, a diferenciação entre a composição volumétrica do concreto convencional e o CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003).

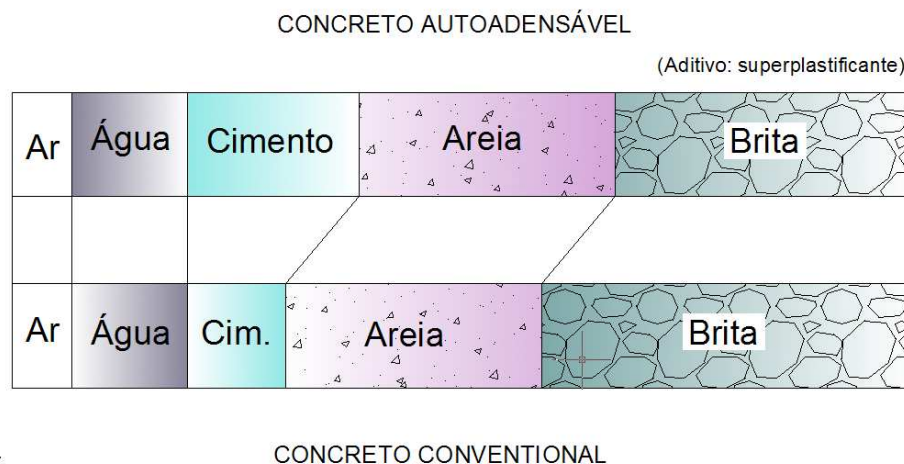


FIGURA 2.12 – Comparação da composição da mistura entre CAA e concreto convencional (OKAMURA e OUCHI, 2003).

Repetto (2008), em seus estudos, expõe algumas particularidades que devem ser seguidas para uma boa dosagem de CAA, resumindo, de forma competente e prática, os itens a seguir:

- Frequentemente, mas não exclusivamente, um superplastificante à base de ácido policarboxílico (3ª geração) é utilizado;
- O teor de finos (partículas com diâmetro $\leq 75 \mu\text{m}$) fica entre 400 kg/m^3 e 600 kg/m^3 .
- A relação de água/finos totais fica compreendida entre 0,80 e 1,10, em volume;
- O uso de aditivo promotor (ou modificador) de viscosidade não é essencial a todas as misturas, mas é especialmente importante quando as partículas finas não estão presentes em volume suficiente;
- Em muitos casos os CAA podem resultar mais baratos e com melhor qualidade com o uso de agregados graúdos de até 10 mm de diâmetro;
- O volume de agregado miúdo está, em geral, entre 35% e 50%, e o volume de agregado graúdo entre 25% e 35%.

É consenso no meio técnico que a qualidade de qualquer tipo de técnica aplicada para a produção de um concreto, em primeiro lugar, é a qualidade dos materiais componentes.

Portanto para se obter as qualidades essenciais do concreto (facilidade de aplicação, resistência mecânica, durabilidade, baixa permeabilidade e constância de volume depois de endurecido) é preciso haver uma seqüência de procedimentos, passando pela seleção cuidadosa e uniformidade dos materiais (tipo e qualidade), proporcionamento adequado entre os materiais constituintes (relação aglomerante-agregados e água-materiais cimentícios), aditivos e adições, bem como uma manipulação adequada quanto à mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento, e por fim, como reforça Tutikian (2004), um eficiente processo de cura.

2.5.4 Adições minerais em CAA

Adições são materiais de origem mineral, compostos basicamente de minerais silicosos ou silico-aluminosos, geralmente em forma pó, com propriedades cimentantes ou pozolânicas, que são incorporados ao concreto ou argamassas, em quantidades variáveis em relação à massa do cimento, geralmente entre 10% e 100%, com a finalidade de melhorar e/ou alterar algumas características desses materiais cimentícios.

De acordo com Dal Molin (2005), as adições minerais classificam-se, conforme sua ação físico-química, em três grandes grupos:

- Material pozolânico: definido pela NBR 12653 (1992) como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas que, quando finamente dividido e em presença de água, é capaz de reagir com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, e formar compostos com propriedades cimentantes. Esta reação é chamada de reação pozolânica;
- Material cimentante: como o próprio nome já diz, não necessita do hidróxido de cálcio (presente no cimento Portland) para formar produtos cimentantes como o C-S-H. No entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta, e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais;

- Filler: adição mineral finamente dividida sem atividade química, cuja ação em compósitos resume-se apenas a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

A ilustração apresentada na figura 2.13 possibilita a visualização do efeito filler através da ação conjunta de uma adição mineral de elevada finura, um aditivo químico superplastificante, cimento Portland e água (CORDEIRO, 2006).

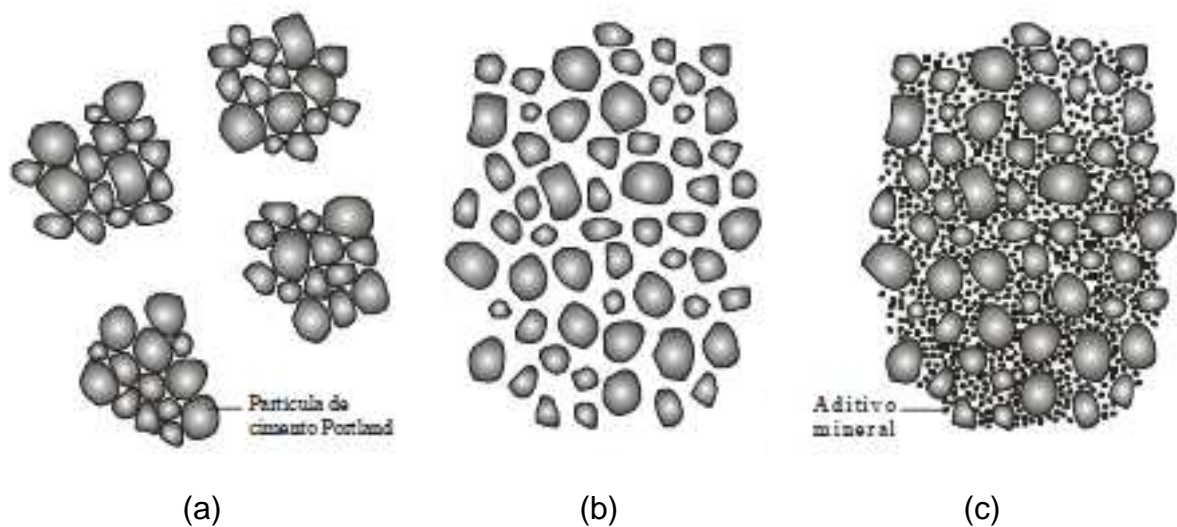


FIGURA 2.13 – Representação esquemática de: partículas de cimento Portland em pastas sem aditivos (a); com aditivo superplastificante (b) e, com superplastificante e aditivo mineral de elevada finura (c) (CORDEIRO, 2006).

O uso de pozolanas em concretos teve início na década de 60 em obras de barragens com adição de cinza volante visando redução no calor de hidratação e custos. A inclusão de adições minerais nos concretos intensificou-se com o uso de microssílica nos anos 70, objetivando concretos de altas resistências sem comprometimento da sua trabalhabilidade.

As adições minerais do tipo pozolânica, quando introduzidas ao concreto no estado fresco, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência do concreto.

Isaia (1995) e Dal Molin (2005), concluíram em seus intensos estudos experimentais, que essas adições também promoviam aumento significativo na durabilidade das estruturas de concreto por modificarem a microestrutura da pasta de cimento hidratada, alterando a estrutura dos poros e tamanhos dos grãos, promovendo redução na porosidade capilar do concreto, responsável pelas trocas de umidade, íons e gases com o meio, além de diminuir o calor de hidratação e, conseqüentemente, as fissuras de origem térmica.

Neville (1997) afirma, com relação aos aspectos técnicos, que a utilização de pozolanas resulta em refinamento dos poros, maior densificação e resistência tanto da pasta como da interface pasta-agregado. Aïtcin (2000) reforça que este efeito torna o concreto resistente à agressividade do meio ambiente.

Como cita Dal Molin (2005) e Isaia (1995), as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de subprodutos industriais e agroindustriais, que na maioria das vezes são descartados em grandes quantidades e em locais impróprios. As pozolanas provenientes de resíduos industriais, como a sílica ativa, a cinza volante, a escória de alto forno e a proveniente de subprodutos agrícolas, como a cinza da casca de arroz, estão entre as mais utilizadas. Por substituírem um material de elevado custo como o cimento Portland, proporciona vantagens econômicas e ambientais.

Dessa forma, o uso de adições minerais na indústria do cimento e do concreto em substituição parcial do clínquer ou do cimento, não só reduz o impacto ambiental causado pelos resíduos de outras indústrias quando jogados em depósitos sem destino adequado, mas também reduz o volume de extração de matérias-primas por parte da indústria cimenteira, preservando os recursos naturais limitados, como a argila e o calcário.

Deve-se reforçar que a eficiência de uma adição mineral é dependente de vários fatores, como: quantidade utilizada, condições de cura e, principalmente, da sua composição química, mineralógica e granulométrica. As duas últimas características são as principais responsáveis pela ação diferenciada das adições no comportamento do concreto, como bem resume Dal Molin (2005) e Cordeiro *et al.* (2010).

A inclusão de pozolanas no concreto, segundo Isaia (1995), altera a velocidade de carbonatação, dada a possibilidade de interação entre o consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas e de carbonatação, caso as condições de cura do concreto não forem realizadas adequadamente ou à interferência de outros fatores. Pode ainda colaborar com a alteração na velocidade de carbonatação o modo de dosagem da pozolana, se por adição ou por substituição em massa ou volume, implicando em relações água/aglomerante diferentes e, portanto, em graus de porosidade e desempenho diversos.

Em se tratando de concretos autoadensáveis, as adições minerais têm a função de promover coesão, preenchimento de vazios e dar estabilidade ao sistema. Quando apresentam poder pozolânico, contribuem, também, para a formação de compostos resistentes no material endurecido.

Muitas pesquisas em CAA têm utilizado, com sucesso, materiais alternativos (resíduos) como adições minerais. Como um dos principais e comumente estudado, é o uso da cinza volante como agente coesivo (TUTIKIAN, 2007; POON e HO, 2004; SAHMARAN *et al.*, 2006).

Vita *et al.* (2010) tratam da inserção de microssílica e metacaulim. Uma das exigências para o uso destes materiais finos pozolânicos é que tenham uma área superficial maior do que a do componente que estão substituindo.

Há também estudos que se utilizam da cinza do bagaço da cana de açúcar, como o trabalho experimental desenvolvido por Anjos *et al.* (2010), inclusive em substituição parcial ao cimento.

Cordeiro (2006), referenciando estudo de Manhães (1999), comenta que as cinzas residuais do bagaço da cana-de-açúcar, após queima em caldeiras, são utilizadas como adubo nas lavouras, muito embora não apresente nutrientes minerais adequados para essa finalidade. No entanto, o pesquisador chama a atenção para aplicabilidade do uso da cinza do bagaço em materiais de construção, mesmo em estado estrutural cristalino e com pouca reatividade hidráulica, ainda que sejam observados altos teores de sílica em forma de quartzo.

Na tabela 2.10 apresentam-se resultados da composição química de cinzas do bagaço da cana de açúcar, em termos de óxidos, determinados nos estudos de Anjos (2009), Cordeiro (2006), Massazza (2004), Goyal *et al.* (2007) e Martirena Hernández *et al.* (1998).

TABELA 2.10 – Composição de cinzas do bagaço da cana de açúcar, em termos de óxidos, determinados por Borja *et al.* (2010), Cordeiro (2006), Massazza (2004), Goyal *et al.* (2007) e Martirena Hernández *et al.* (1998).

Composição	BORJA	CORDEIRO	MASSAZZA	GOYAL	MARTIRENA HERNÁNDEZ
SiO ₂	72,69	78,34	75,0	62,43	72,74
Al ₂ O ₃	6,91	8,55	6,7	4,38	5,26
Fe ₂ O ₃	9,61	3,61	6,3	6,98	3,92
TiO ₂	0,72	0,50	-	-	0,32
CaO	2,84	2,15	2,8	11,8	7,99
MgO	-	1,65	3,2	2,51	2,78
SO ₃	0,92	-	-	1,48	0,13
K ₂ O	4,71	3,46	2,4	3,53	3,47
Na ₂ O	0,00	0,12	1,1	-	0,84
P ₂ O ₅	-	1,07	4,0	-	1,59
Perda ao Fogo	18,9	0,42	0,9	4,73	0,77

Observa-se, com base na tabela 2.10, que as cinzas dos pesquisadores citados apresentam composição bastante variada, colaborando com a assertiva de que as características da cinza são influenciadas pelas condições de queima do bagaço e da umidade que o mesmo apresenta. No entanto, constata-se um alto teor de dióxido de silício, superior a 60% em massa, para todas as pesquisas.

Barboza Filho e Prabhu (2002), citados por Cordeiro (2006), justificam que a grande quantidade de dióxido de silício presente nas cinzas deve-se ao silício absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄). Outra possível fonte de sílica é a areia oriunda da lavoura da plantação da cana de açúcar, que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem no processamento.

A morfologia das partículas da cinza do bagaço, ilustrada na figura 2.14 (CORDEIRO, 2006), registra a contaminação de partículas de quartzo na sua composição. As setas vermelhas indicam as partículas de quartzo e as setas laranja, as cinzas do bagaço da cana de açúcar.

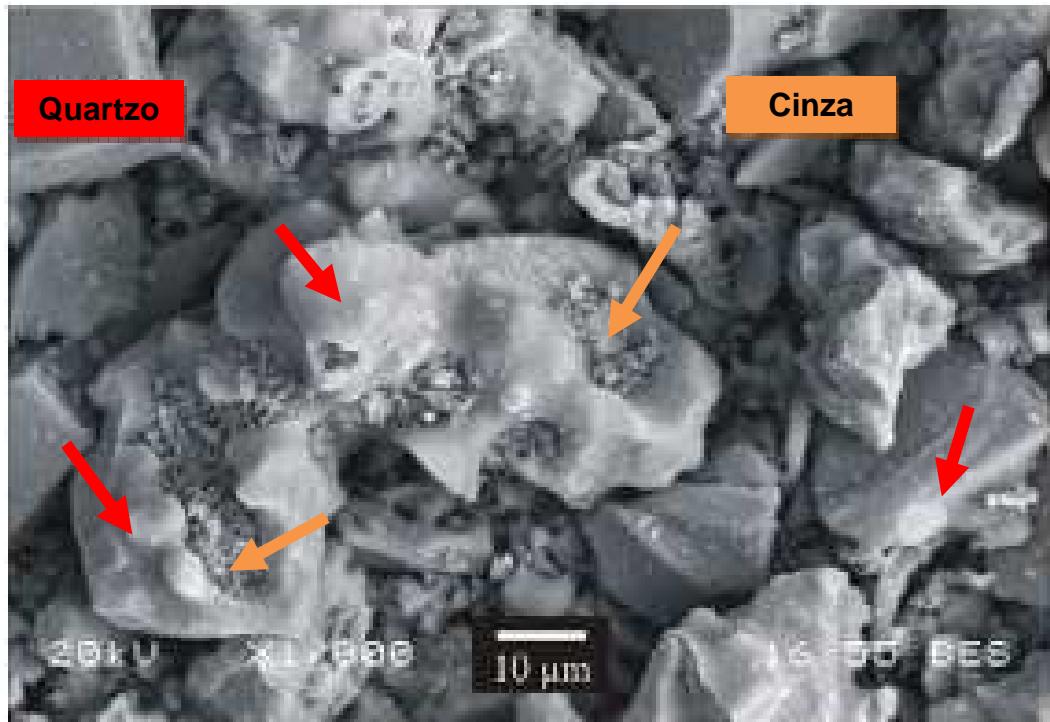


FIGURA 2.14 – Morfologia das partículas da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com partículas de quartzo (CORDEIRO, 2006).

A crescente produção de cana-de-açúcar e como consequência a elevada geração de toneladas de cinza de biomassa, principalmente nos estados produtores, tem motivado a busca por aplicações que possam agregar maior valor a este subproduto, dentre as quais se destaca o emprego como aditivo mineral em sistemas cimentícios.

Entretanto, como bem destaca Cordeiro *et al.* (2010), a distribuição granulométrica variável da cinza, própria de um sistema de obtenção sem qualquer classificação, aponta para a necessidade de moagem para elevar a reatividade, pelo aumento da superfície específica das partículas e conferir maior homogeneidade do material.

A tabela 2.11, adaptada de Tutikian e Dal Molin (2008) *apud* Palareti (2009), apresenta, de forma resumida e esclarecedora, as principais características e conseqüências de adições minerais nas propriedades do CAA.

TABELA 2.11 – Características e conseqüências de emprego de adições minerais nas propriedades do CAA (TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008) *apud* PALARETI (2009)).

Adição Mineral	Cinza Volante	Escória de alto-forno	Sílica Ativa	Metacaulim	Cinza de casca de arroz
Origem	Calcinação de carvão pulverizado em usinas termoeletricas, com o objetivo de gerar energia	Subproduto não-metálico resultante do processo de obtenção do ferro gusa	Subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico	Calcinação de alguns tipos especiais de argila ou obtido através do tratamento do resíduo da indústria de papel	Calcinação da casca de arroz
Forma e Textura	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera	Alveolar e áspera
Massa Específica (kg/m³)	2350	-	2200	2400	2200 a 2600
Superfície específica (m²/kg)	300 a 700	300 a 700	13.000 a 30.000	Variável em função da moagem	50.000 a 100.000
Tamanho médio das partículas	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem	0,1 a 0,2 µm	Variável em função da moagem	Variável em função da moagem
Efeito do CAA fresco quando utilizado como substituição ao cimento	Aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas, normalmente reduz o consumo de superplastificante	Aumento da coesão, redução da exsudação e segregação, não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas, pouco altera o consumo de superplastificante	Elevadíssimo aumento da coesão, redução acentuada da exsudação e segregação, melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas, aumento do consumo de superplastificante, teores acima de 5% da massa do cimento	Grande aumento da coesão, redução acentuada da exsudação e segregação, não contribui para fluidez em função da forma e textura das partículas, aumento do consumo de superplastificante	Elevadíssimo aumento da coesão, redução acentuada da exsudação e segregação, piores condições de fluidez em função da forma e textura das partículas, elevado aumento no consumo de superplastificante
Efeito do CAA endurecido quando utilizado como substituição ao cimento	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade

Em aplicações de resíduos inservíveis quimicamente não reativos, em substituição parcial ao agregado miúdo, pode-se citar o estudo de Barbosa e Oliveira (2010), que utilizam pó de pedra (areia artificial) na produção de CAA. Seguindo esta linha de pesquisa, tem-se os estudos de Pagnussat *et al.* (2006), Lisbôa (2004), Barros (2008) e Coelho *et al.* (2010), que utilizaram a incorporação de resíduo de serragem de granito e mármore no CAA.

Quintana Júnior e Betorcini (2010) relatam sobre o uso de areia artificial e fino de resíduo de vidro. Já Silva *et al.* (2010) estudaram a avaliação de CAA com agregado reciclado de telha cerâmica.

Recentes pesquisas têm incorporado resíduos de pó orgânico como pó de carnaubeira (COELHO e MESQUITA, 2010), visando melhorias nas propriedades mecânicas e durabilidade no concreto autoadensável.

2.5.5 Proporcionalamento da mistura (dosagem)

Existem vários conceitos para a concepção do CAA. No entanto, a meta é sempre a de alcançar um nível adequado de fluidez, estabilidade e capacidade de execução (aplicação), ao menor custo. Esta condição e equilíbrio não são fáceis de ser atingida, exigindo extensos estudos laboratoriais preliminares.

Como para qualquer concreto, as características de desempenho almejadas deverão ser primeiramente, antes de qualquer procedimento, pré-estabelecidas. De posse dessas informações norteadoras, parte-se então, para os procedimentos de dosagem, que segundo Daczko e Vachon (2006), quatro princípios básicos devem ser considerados:

Passo 1: Concepção da pasta

A pasta é a força motriz do desenvolvimento da resistência e durabilidade, devendo-se se cercar de grandes cuidados na sua concepção. A elaboração da pasta envolve, essencialmente, a determinação da relação água/cimento (*a/c*) e a

relação dos materiais cimentícios, inclusive as adições e/ou substituições minerais, baseadas nas necessidades de resistência estrutural e de durabilidade.

As relações que direcionam os procedimentos de proporcionamento para concretos convencionais, no que diz respeito à resistência e durabilidade, são as mesmas para o CAA e, por conseguinte, deverá ser elaborado sob as mesmas orientações e procedimentos.

Documentos normativos relacionados ao tema irão orientar na seleção direta do tipo de cimento, adições minerais (materiais cimentícios suplementares) e, a relação água/materiais cimentícios.

Passo 2: Otimização da quantidade da pasta

A seleção da quantidade da pasta é uma parte crítica da mistura no processo de dosagem do CAA. A pasta é a fase que fornece a plasticidade/trabalhabilidade ao concreto. A determinação do volume ótimo da pasta é um processo complexo. O concreto apresenta comportamento inicial como um material plástico quando todos os espaços vazios entre os agregados são preenchidos (figura 2.15).



FIGURA 2.15 – Otimização da quantidade da pasta (DACZKO e VACHON, 2006).

Devido ao elevado nível de fluidez, necessário para atingir a completa compactação sem energia externa, o CAA requer maiores quantidades do volume da pasta. Este volume complementar (pasta de fluidez) deverá lubrificar e espaçar adequadamente os agregados, de forma que o atrito interno entre os mesmos não comprometa a capacidade do concreto de escoar.

No entanto, outro fator deve ser levado em consideração por influenciar na fluidez do concreto: a fluidez da massa é aumentada pela adição de superplastificante e a sua capacidade de manter o conjunto em suspensão diminui.

Assim, a fluidez de concreto é regida pela combinação bem equilibrada entre o volume de vazios, obtidos através da combinação entre os agregados secos, o volume da pasta de fluidez, e o nível de fluidez da pasta.

Passo 3: Proporcionamento do agregado

A quantidade (proporcionamento) do agregado terá um efeito direto sobre a quantidade da pasta de enchimento e, indiretamente, sobre o custo da matéria-prima do CAA. Em seguida, é importante otimizar a proporção de agregados para obtenção da maior densidade de empacotamento possível. Para um determinado conjunto de agregados, a maior densidade de empacotamento é geralmente obtida com frações granulométricas contínuas. No entanto, quando os agregados fluem através das armaduras, o agregado graúdo, na maioria das vezes, tende a restringir o fluxo do CAA, bloqueando os espaços entre as barras de aço (Figura 2.16).

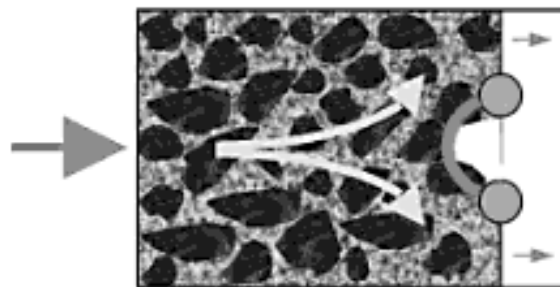


FIGURA 2.16 – Bloqueamento dos espaços das barras pelos agregados graúdos (DACZKO e VACHON, 2006).

Por conseguinte, o proporcionando dos agregados deve ser feito a fim de alcançar o equilíbrio entre a alta densidade de empacotamento e obtenção de fluidez através dos espaços entre as armaduras e previamente testados por equipamentos que simulem as condições reais (TUTIKIAN, 2004).

Passo 4: Ajustes da dosagem com incorporação de aditivos

O uso de aditivos superplastificantes em CAA, necessários para aumentar a fluidez do concreto, acaba por diminuir a sua viscosidade, sendo recomendável, o uso concomitante de modificadores de viscosidade.

Assim, como acontece com qualquer outro tipo de concreto, misturas com aditivos, necessários para obter a fluidez no nível desejado, terá que ser otimizada experimentalmente, uma vez que cada tipo de aditivo reage de modo diferente para cada tipo de cimento.

2.5.6 Ensaios e requisitos do CAA no estado fresco

Os ensaios realizados para caracterização do CAA diferenciam-se do concreto convencional apenas quando no estado fresco, que determinam de forma direta e indireta os parâmetros reológicos fundamentais do concreto, tais como: tensão de escoamento e viscosidade.

Estudos internacionais (OKAMURA e OUCHI, 2003; OKAMURA e OUCHI, 1999) tratam de equipamentos que servem para avaliar a qualidade do CAA no estado fresco, com destaque para o reômetro, que permite a obtenção da tensão de escoamento e da viscosidade plástica. Porém, dado a dificuldade de realizar tal ensaio em obra, outros ensaios foram idealizados como complementares e também avaliativos do concreto no estado fluido. No entanto, umas das principais dificuldades de aplicação destes ensaios é que nenhum deles isoladamente é capaz de medir as principais propriedades requeridas: fluidez, coesão (habilidade passante) e resistência à segregação, como bem esclarece Tutikian (2004).

Apesar do uso crescente do CAA no País, não havia norma brasileira específica para disciplinar o assunto. A partir de 2008, o Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT CB-18) vem desenvolvendo atividades de normalização visando estabelecer diretrizes para o CAA, culminando com a aprovação da NBR 15823 em 2010, que em seis textos normativos, estabelecem os requisitos para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco,

prescrevendo ensaios específicos a partir de documentos europeus, norte-americanos e da experiência dos envolvidos nos trabalhos da Comissão de Estudo (ALENCAR *et al.*, 2010).

A recente norma (NBR 15823, 2010), segundo Alencar *et al.* (2010), apresenta quatro parâmetros principais para a especificação do CAA, descritos nos subitens seguintes.

2.5.6.1 *Fluidez e escoamento (SF)*

- **Ensaio de espalhamento – *slump flow test***

O valor de espalhamento, medido através do ensaio *slump-flow* é especificado para todos os concretos autoadensáveis como um ensaio primário, esboçando indicações da fluidez do CAA e de sua habilidade de preenchimento das formas em fluxo livre (ausência de obstruções).

A fluidez define-se como sendo a capacidade do concreto de fluir livremente sem segregar. O equipamento utilizado é o mesmo adotado no ensaio de determinação da consistência para o concreto convencional, o molde tronco-cone. O adensamento do concreto dentro do molde tronco-cone, devidamente posicionado sobre o centro de uma base plana, se dá exclusivamente pela força da gravidade (sem compactação ou vibração) (figura 2.17).

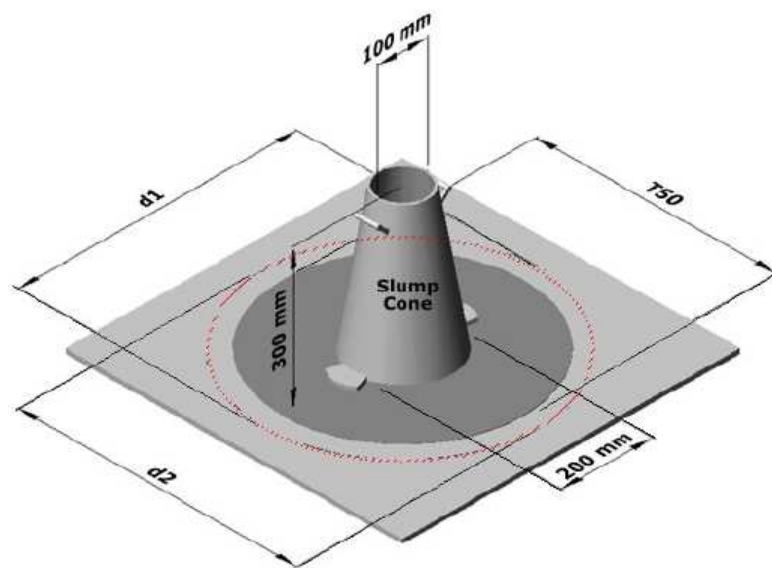


FIGURA 2.17 – Equipamento tronco-cônico e base plana para ensaio *slump-flow* (CAVALCANTI, 2006).

Após o preenchimento, o molde é levantado e o concreto flui livremente. O resultado do ensaio é a média de dois diâmetros perpendiculares do círculo formado pela massa de concreto, conforme ilustrado na figura 2.18.



FIGURA 2.18 – Medição do diâmetro de espalhamento (MANUEL, 2005).

As peças de concreto produzidas com CAA, normalmente, apresentam melhor qualidade superficial (melhor acabamento) quando comparadas com as peças confeccionadas com concreto convencional.

2.5.6.2 Viscosidade plástica aparente (VF ou VS)

A viscosidade do concreto é uma propriedade relacionada à sua consistência no estado fresco e influencia a resistência deste ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior a sua resistência ao escoamento, fazendo com que seu deslocamento (movimento) dentro da fôrma ocorra de forma mais lenta.

A NBR 15823 (2010) especifica o uso de um reômetro para determinação direta da viscosidade e o resultado obtido é expresso em pascal por segundo (Pa.s). Como este ensaio é de difícil execução em obra, como já citado anteriormente, uma avaliação qualitativa da viscosidade do concreto pode ser obtida através da medida do tempo de escoamento do CAA em ensaios que medem sua habilidade em fluir e, por isso, é chamada, na norma, de viscosidade plástica aparente.

O t_{500} é um ensaio que avalia a viscosidade do concreto em fluxo livre, normalmente realizado simultaneamente ao ensaio de espalhamento e consiste na medida do tempo que o CAA leva para atingir a marca de 500 mm de diâmetro (centrada na base da placa de ensaio), após a retirada do molde tronco-cônico.

- **Ensaio do funil “V”**

Assim como o *slump flow test*, o ensaio do funil “V” também serve como parâmetro de medida da fluidez do concreto, que envolve uma avaliação qualitativa da viscosidade aparente do concreto, em fluxo confinado, a partir do registro do tempo que o concreto leva para escoar neste equipamento. Esta medida consiste em cronometrar o tempo que o concreto leva para escoar totalmente através de equipamento em forma de V, conforme ilustrado na figura 2.19.

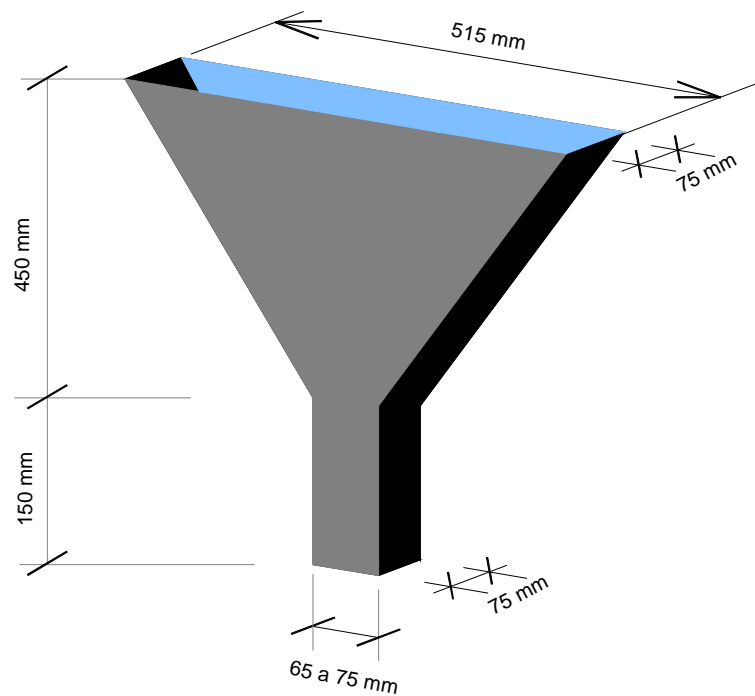


FIGURA 2.19 – Ilustração do funil “V”.

2.5.6.3 Habilidade passante (PL ou PJ)

A habilidade passante informa sobre a capacidade de o concreto fresco fluir, sem perder a uniformidade ou causar bloqueio, através de espaços confinados e aberturas estreitas, como áreas de alta densidade de armadura e embutidos.

- **Ensaio da caixa “L”**

O ensaio utilizando a caixa L, previsto na parte 4 da NBR 15823 (2010), mede a habilidade passante, sob fluxo confinado, através da razão entre as alturas H2 e H1 da superfície do concreto nas extremidades posterior e anterior da câmara horizontal, respectivamente, após aberta a grade de separação entre os compartimentos, como mostra a figura 2.20.

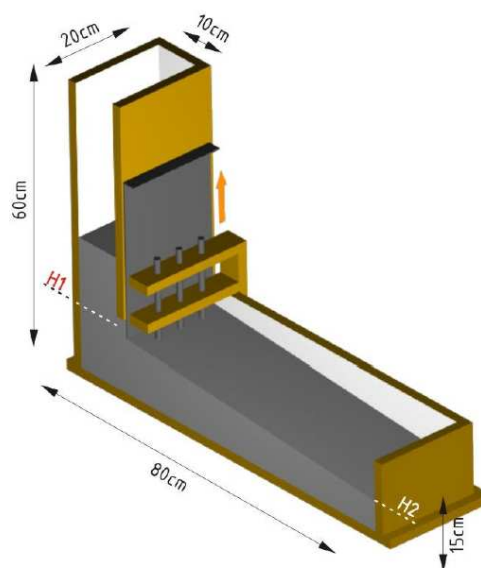


FIGURA 2.20 – Ilustração da caixa “L” e medidas realizadas no ensaio (ALENCAR, 2008).

O comitê Europeu para normatização, como expõe Alencar *et al.* (2010), considera o tempo que o CAA leva para atingir as marcas de 20 cm e 40 cm da fase de contenção. Pelos estudos realizados para o desenvolvimento da Norma Brasileira, verificou-se que essa medida não é operacional, particularmente para concretos de baixa viscosidade, pois se necessita de duas marcações de tempo em um intervalo muito curto. Além disso, o foco do ensaio é a habilidade passante e não a viscosidade do concreto.

Como o CAA não se comporta totalmente como um fluido Newtoniano (fluido ideal) é necessário um tempo mínimo para sua estabilização no equipamento, normalmente entre 30s e 60s, evitando mascarar resultados em obra, pois se o CAA for despejado e imediatamente for aberta a comporta do equipamento de ensaio (caixa-L), o escoamento do concreto será facilitado.

▪ Ensaio do anel “J”

Normalizado pela ASTM 1621, o ensaio do anel J, previsto na parte 3 da Norma Brasileira e ilustrado na figura 2.21, consiste no mesmo molde tronco-cônico do ensaio de espalhamento para verificar se o concreto passa por 16 barras de aço

igualmente distribuídas no anel. A medida da habilidade passante é obtida pela diferença entre o espalhamento medido no ensaio de *slump-flow*.

A determinação da habilidade passante pode ser desnecessária no caso de ausência ou baixa densidade de armadura.

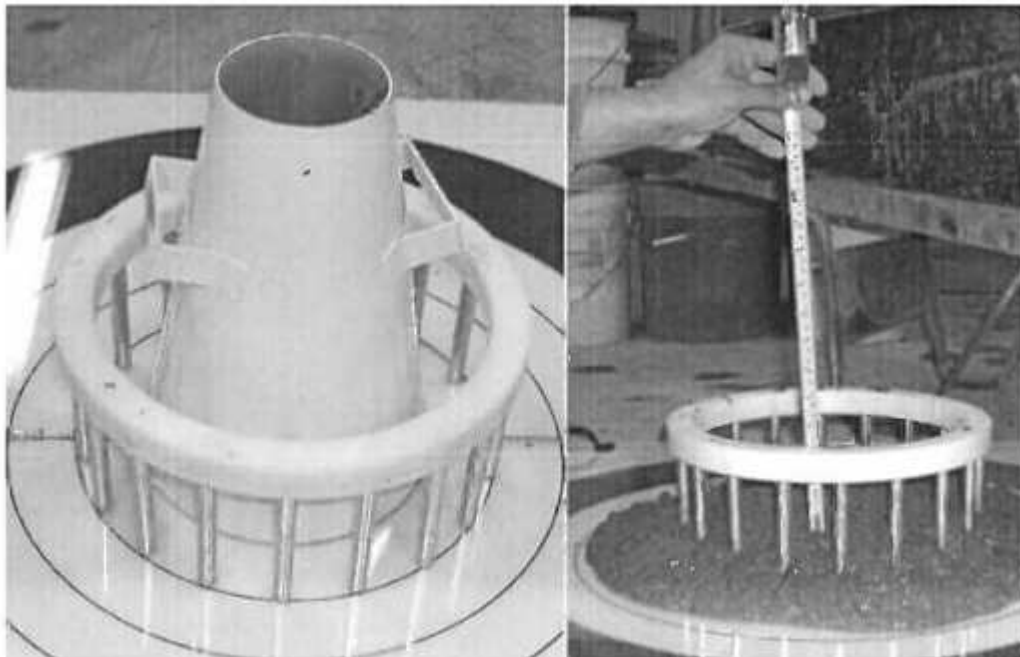


FIGURA 2.21 – Detalhe do anel “J” (HOLM e RIES, 2006).

2.5.6.4 Resistência à segregação (SR)

A resistência à segregação é a capacidade do concreto de permanecer com sua composição homogênea durante as etapas de transporte, lançamento e acabamento. Sendo que, a segregação pode ocorrer de duas maneiras:

- **Estática:** associada aos fenômenos de sedimentação, que ocorre quando o concreto está em repouso dentro das fôrmas;
- **Dinâmica:** durante o lançamento, enquanto o CAA flui dentro da fôrma.

O concreto sofre segregação dinâmica durante o lançamento e segregação estática após o lançamento. A segregação estática é mais danosa em elementos estruturais altos, mas também em lajes pouco espessas, podendo levar a defeitos, como fissuração e enfraquecimento da superfície.

A segregação dinâmica é facilmente detectada nos ensaios de estado fresco e pode ser corrigida durante a etapa de dosagem. A resistência à segregação é particularmente importante em concretos autoadensáveis de maior fluidez e baixa viscosidade.

- **Ensaio da coluna de segregação**

Na norma brasileira NBR 15823 (2010), a avaliação da resistência à segregação é dada pelo ensaio da Coluna de Segregação, que teve como base o que estabelece a ASTM C 1610. Este ensaio tem sido muito difundido, pela facilidade de execução. A aparelhagem consta de um tubo de PVC, seccionado em três partes de medidas padronizadas, que são devidamente fixadas, apoiadas sob uma base rígida, onde o CAA é despejado (figura 2.22).

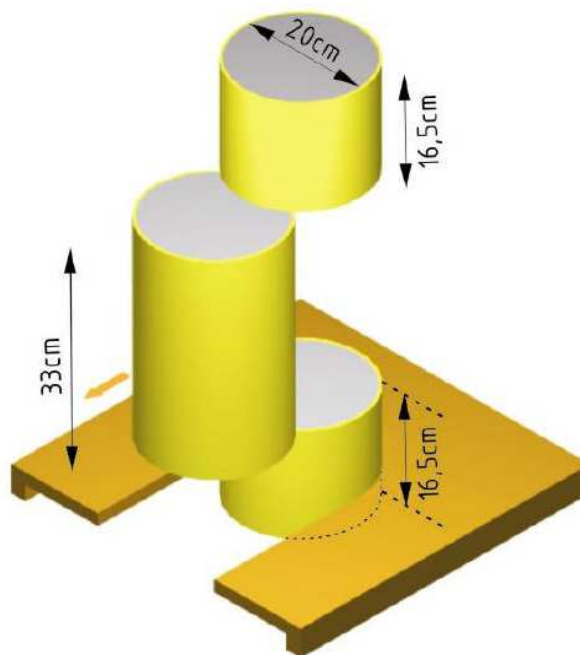


FIGURA 2.22 – Desenho esquemático da coluna de segregação (ALENCAR, 2008).

Após cerca de 20 min., é possível extrair as porções de concreto, com auxílio de uma chapa metálica. As amostras são lavadas e peneiradas para remoção da argamassa e separação dos agregados graúdos, com a determinação da massa daqueles que ficaram alojados no topo (m_T), e dos da base (m_B). Com isso, se

estabelece o índice de segregação em função da porcentagem de agregado graúdo em cada porção da amostra.

A norma americana, contudo, não prevê uma classificação como a recomendada pela norma européia, que utiliza outra metodologia para a mesma determinação. Baseado no ensaio da ASTM, Alencar (2008) obteve satisfatória correlação com a classificação a norma européia (EN 206-9, 2010) para aplicações em produção.

A ABNT NBR 15823 (2010) classifica o CAA no estado fresco em função dos parâmetros apresentados e, seguindo a linha européia da EN 206-9, recomenda, em anexo informativo, a correlação dessa classificação com a aplicação do concreto em campo, como exemplifica a tabela 2.12.

TABELA 2.12 – Classes de espalhamento, viscosidade plástica aparente, habilidade passante e resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação (ALENCAR *et al.*, 2010).

Propriedades Ensaio	Classes	Aplicação	Exemplo
Espalhamento (<i>slump-flow</i>) (mm)	SF 1: 550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	Lajes
		Concreto autoadensável bombeado	Revestimento de túneis
	SF 2: 660 a 750	Estruturas que exigem um curto espalhamento horizontal do concreto autoadensável	Estacas e certas fundações profundas
Viscosidade plástica aparente t_{500} (s) / Funil V (s)	VS 1: ≤ 2	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
	VF 1: ≤ 8	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm)	Pilares-parede, paredes diafragma e pilares
	VS 2: > 2	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação	Lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
	VF 2: 9 a 25	Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre	Vigas, pilares e outras
Habilidade passante Anel J (mm)	PL 1: (25 A 50 mm, com 16 barras)	Adequado para a maioria das aplicações correntes.	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados
	PJ 1: ($\geq 0,80$, com 3 barras de aço)	Elementos estruturais com espaçamento de armadura de 60 mm a 80 mm	
Caixa L (H2/H1)	PL 2: (0 a 25 mm, com 16 barras de aço)	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm	Lajes, painéis, elementos de fundação
	PJ 2: ($\geq 0,80$, com 3 barras de aço)		
Resistência à segregação	SR 1: ≤ 20	Distância a ser percorrida < 5 m	Lajes de pequena espessura, estruturas convencionais de pouca complexidade
		Espaçamento entre armaduras > 80 mm	
Coluna de segregação (%)	SR 2: ≤ 15	Distância a ser percorrida > 5 m	Elementos de fundações profundas
		Espaçamento entre armaduras > 80 mm	
		Distância a ser percorrida < 5 m	Pilares, paredes, elementos estruturais complexas e elementos pré-moldados
		Espaçamento entre armaduras < 80 mm	
Nota 1 – SR 2 ou um valor-limite mais rigoroso pode ser especificado se a resistência ou a quantidade da superfície for particularmente crítica.			
Nota 2 – Quando a distância a ser percorrida pelo concreto for maior que 5 m e espaçamento inferior a 80 mm, deve ser especificado um valor de SR menor que 10%.			

A NBR 15823 (2010), segundo Alencar *et al.* (2010), apresenta ainda conceitos sobre procedimentos de ensaios para a aceitação do CAA no estado fresco, devendo ser baseada, no mínimo, na comprovação das seguintes propriedades:

- **Fluidez e viscosidade** – avaliadas pelo ensaio de espalhamento e t_{500} , para cada betonada (caminhão);
- **Habilidade passante** – avaliada pelo ensaio do anel J, a cada 30 m³.

Caso sejam especificados os ensaios da caixa L e/ou funil V, pode ser dispensada a realização dos ensaios do anel J e/ou t_{500} , respectivamente.

Acredita-se que uma avaliação do CAA apenas por meio do ensaio de espalhamento pode não ser suficiente para comprovar o nível de autoadensibilidade adequado à estrutura.

A referida Norma ressalta ainda que seus procedimentos se aplicam ao concreto com massa específica normal (2000 kg/m³ a 2800 kg/m³), devendo ser avaliada, de forma individualizada, a aplicabilidade dos requisitos estabelecidos para o CAA com inclusão intencional de ar, agregados leves, agregados pesados e fibras.

Diante do exposto, pode-se concluir que os parâmetros não podem ser considerados de forma isolada, pois todas as propriedades no estado fresco são interdependentes (ALENCAR *et al.*, 2010).

3 ESTADO DA ARTE

O baixo peso específico e a alta capacidade como material isolante são as características de maior destaque do concreto leve e que as distingue do concreto convencional. Porém, estas não são as únicas características que justificam maior atenção por parte dos pesquisadores a este tipo de material (EUROLIGHTCON, 1998). Chi *et al.* (2003) destaca que a utilização de agregados leves ocasiona mudanças significativas em outras importantes propriedades dos concretos, como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, retração, fluência e também redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Para o EuroLightCon (1998), é preciso considerar alguns fenômenos básicos a fim de compreender como a aplicação de um agregado leve pode alterar ou modificar o comportamento do concreto de forma significativa. Para isso, pode-se considerar o concreto, no estado fresco, como um material de duas fases: a fase plástica (pasta) e a fase rígida (agregado). Na fase plástica, o composto cimentício exibe alta heterogeneidade. Durante o processo de endurecimento, o material muda de material heterogêneo para um material mais homogêneo. Entretanto, este entendimento é complexo e depende em que nível o material é analisado, ou seja, macroestrutural, onde as propriedades da engenharia do concreto são definidas (propriedades físicas e mecânicas), ou microestrutural, onde os processos de hidratação e desenvolvimento da microestrutura são descritos, incluindo as micropropriedades da zona interfacial entre o agregado e a matriz.

Em concretos leves, o processo de hidratação da pasta cimentícia altera significativamente a forma como a pasta de cimento interage com os agregados em diferentes fases da vida útil do concreto, influenciando diretamente sobre todas as suas propriedades. Na etapa de mistura e aplicação, os poros dos agregados leves absorvem água afetando a trabalhabilidade do concreto, bem como a relação água-aglomerante (NEVILLE, 1997). Na fase de endurecimento, a água inicialmente

acumulada nas partículas do agregado poroso, ao ser liberada lentamente, poderá ocasionar alterações no processo de hidratação na sua fase inicial.

3.1 Cura interna

ACI 213R-87 (1999) destaca que concreto leve com agregados que apresentam elevado teor de absorção de água devem ser combinados com agregados miúdos naturais, no intuito de promover uma cura interna satisfatória, principalmente em concretos contendo um alto volume de materiais cimentícios, uma vez que estes tipos de concreto são vulneráveis ao surgimento de fissuras de retração provocadas pelo processo inicial de endurecimento do cimento. Desta forma, promove-se, de forma benéfica, a liberação lenta da umidade interna presente nos agregados leves.

Segundo Hamrol (1972), outro aspecto a ser enfatizado é a quantidade de água absorvida pelos agregados leves, que é muito superior à dos agregados normais. Este aspecto altera as relações água/materiais cimentícios habituais e obriga à decomposição da água total em água livre ou efetiva e a água contida nos poros destes agregados. Como citado Silva (2007), referenciando Dreux (1986), este problema é ainda mais delicado pelo fato da absorção inicial de água ser significativa, existindo migrações de água, mesmo durante a fabricação do concreto, que fazem variar a quantidade de água livre em função do tempo de amassamento.

Melo (2000) faz referência sobre a importância da quantidade de água a ser utilizada na composição dos concretos leves, considerando-a a variável de mais difícil determinação pelo alto teor de absorção dos agregados leves e que se não for cuidadosamente equacionada, a água disponível para a hidratação do cimento poderá ser insuficiente, inclusive com efeitos negativos nas características mecânicas ou na trabalhabilidade do concreto.

Hamrol (1972) demonstrou a efetiva melhora na qualidade do concreto leve produzido com agregados pré-umedecidos em razão da melhor hidratação do material cimentício ao longo do tempo, uma vez que a umidade presente no interior

dos poros do agregado serve como reservatório, liberando de forma lenta a água durante este processo.

3.2 Propriedades físicas e mecânicas do concreto leve

A maioria dos agregados leves, segundo Clarke (2005), produzem concretos estruturais cuja resistência à compressão atinge valores máximos de 35 MPa e, um número limitado destes agregados, produzem concretos que desenvolvem resistências, em amostras cilíndricas, superiores a 69 MPa.

A resistência e massa específica do concreto leve variam consideravelmente, dependendo do tipo de agregado utilizado. Para Clarke (2005), os resultados de testes experimentais de resistência à compressão e massas específicas secas (ao ar) realizados em concretos leves confeccionados com diferentes tipos de agregados europeus e apresentados na tabela 3.1 e figura 3.1, evidenciam a complexidade de correlacionar propriedades físicas com propriedades mecânicas, em se tratando de concretos leves. O autor chama atenção para a relação resistência/massa específica do concreto leve (tabela 3.1) em comparação com a relação resistência/massa específica do concreto convencional (resistência de 30 MPa e massa específica de 2500 kg/m³).

TABELA 3.1 – Resultados de resistência à compressão e massa específica de concretos leves a partir do trabalho desenvolvido pela *British Cement Association*, 2002 (CLARKE, 2005).

Agregado	Resistência (MPa)	Massa Específica (kg/m ³)	Relação resistência /massa específica*
<i>Lytag</i>	70	1850	3,2
<i>Pellite</i>	55	2050	2,2
<i>Liapor</i>	45	1550	2,4
<i>Leca</i>	20	1650	1,5
<i>Fibo</i>	25	1500	1,4

* valores obtidos através da relação resistência/massa específica do concreto leve dividido pela relação resistência/massa específica do concreto convencional (0,012)

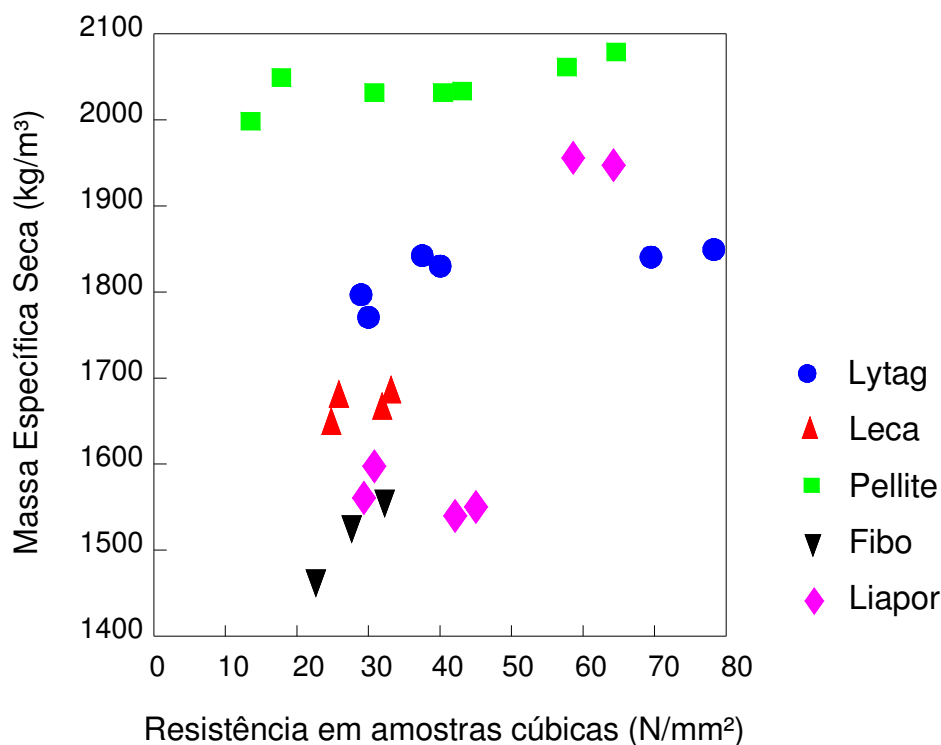


FIGURA 3.1 – Relação entre a massa específica seca e a resistência à compressão de concreto leve confeccionado com vários tipos de agregados leves europeus (*British Cement Association, 2002 apud CLARKE, 2005*).

No trabalho de pesquisa desenvolvido por Moravia (2007), realiza-se um estudo comparativo entre as resistências de concretos leves, produzidos com argila expandida, e concretos convencionais, fabricados com agregado proveniente de rocha calcária britada, aos 3, 7 e 28 dias, para quatro dosagens distintas de resistências estimadas em 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa e 40MPa. Os concretos leves apresentaram uma redução de aproximadamente 22% a 28% na resistência à compressão em relação aos concretos convencionais. De acordo com o autor, esta queda na resistência à compressão, para os concretos produzidos com argila expandida, deve-se a baixa resistência mecânica deste tipo de agregado.

Em estudo mais recente sobre concreto leve (PEREIRA, 2008), foi abordado à aplicação de duas granulometrias de argilas expandidas em três formulações, com foco nas propriedades mecânicas, interface agregado-matriz, porosidade e perfil de absorção de íons cloreto. Para as três misturas analisadas, foi observado valores de resistência à compressão ligeiramente superiores a 20 MPa, consideradas, segundo o autor, como concretos leves estruturais frente à exigência da NBR 6118 (2003). Em análise comparativa com os concretos tradicionais, os concretos leves

apresentaram redução nos valores da massa específica entre 32% e 39%. A alta porosidade da argila expandida não contribuiu de forma significativa para a penetração de cloreto no concreto, atribuindo-se este desempenho a boa aderência entre o agregado e a matriz cimentícia, além da similaridade dos módulos das partículas do agregado leve e da pasta. O autor também observou que os concretos apresentaram pequena porosidade em relação ao sistema de poros da argila expandida.

3.3 Módulo de elasticidade do concreto leve

O uso de agregados leves em concreto com intuito de reduzir o seu peso específico acaba por alterar suas propriedades elásticas quando comparados aos concretos convencionais e, em particular, o módulo de deformação, entre outras propriedades.

Segundo De Pauw *et al.* (1995), nos concretos, o módulo de elasticidade depende da fração volumétrica entre a pasta e o agregado e do módulo de elasticidade de cada material que o compõe. Como os agregados utilizados em concretos convencionais apresentam maiores valores de módulo de elasticidade em relação ao agregado utilizado em concreto leve, estes, conseqüentemente, apresentam também menor módulo de elasticidade.

A figura 3.2, adaptada da norma ACI 213R-87 (1999), ilustra a variação dos valores do módulo de elasticidade para os concretos leves.

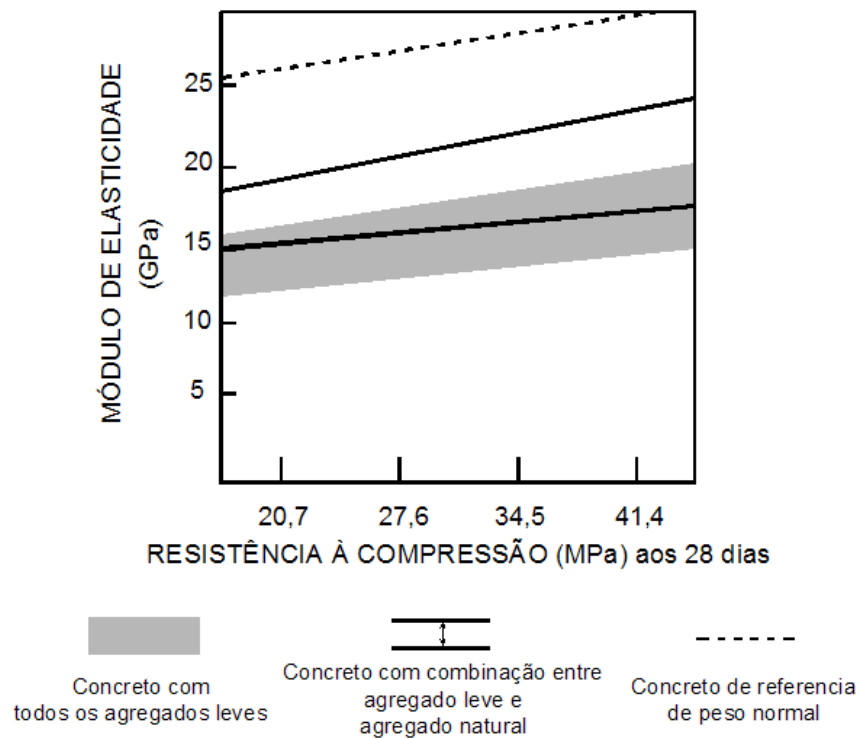


FIGURA 3.2 – Módulos de elasticidade para concretos leves (ACI 213-87, 1999).

Varição na graduação do agregado leve geralmente tem pouco efeito no módulo de elasticidade se a relação volumétrica entre a pasta de cimento e agregados permanecerem praticamente constantes (ACI 213R-87, 1999).

Zhang and Gjrv (1990) observaram que as propriedades elásticas do agregado e a boa ligação entre os produtos de hidratação do cimento e o agregado leve acabam por influenciar sobre o módulo de elasticidade do concreto leve, caracterizando uma curva de maior linearidade no ensaio de tensão-deformação quando comparado a concretos convencionais para um mesmo patamar de resistência mecânica.

Nos seus estudos, Carrasquillo *et al.* (1981), referenciado por Rossignolo (2003), traçaram curvas do diagrama tensão-deformação para concretos leves de alta, média e baixa resistência (figura 3.3), comprovando também a linearidade no trecho ascendente da curva. Verifica-se ainda que, após atingir a carga máxima, a curva torna-se bastante íngreme antes da ruptura.

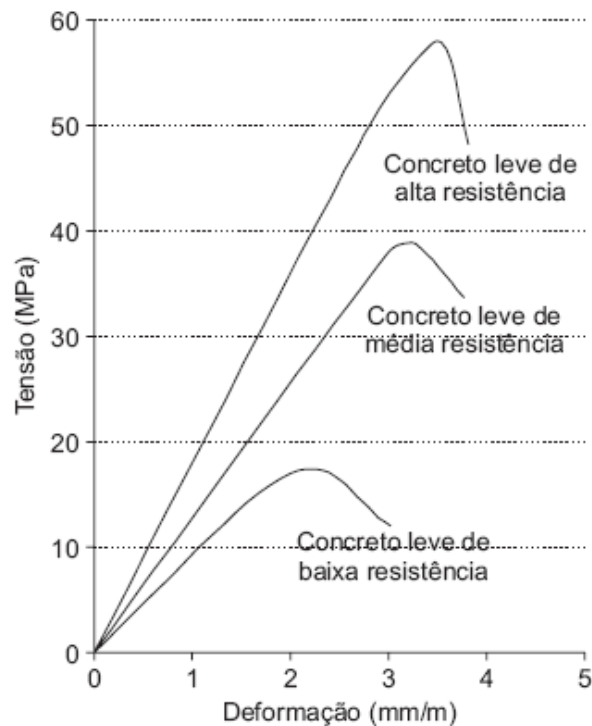


FIGURA 3.3 - Ilustração do comportamento da curva tensão-deformação dos concretos com agregados leves (CARRASQUILLO *et al.* apud ROSSIGNOLO, 2006).

3.4 Zona de transição

No concreto de cimento Portland, a pasta cimentícia forma uma espécie de anel em torno do agregado, no qual a cristalização dos hidratados é diferente da existente em outra região da mesma pasta. Essa camada se constitui com características de menor desempenho do concreto por ser uma região que apresenta uma maior relação água/cimento e de menor coesão, facilitando a propagação de fissuras (PAULON e MONTEIRO, 1991).

Neville (1997) explica que uma das causas para a microestrutura da pasta de cimento hidratada na vizinhança imediata das partículas do agregado gráúdo diferirem do restante da microestrutura da pasta de cimento é que, durante a mistura, as partículas de cimento seco não se dispõem de forma densa juntamente com as partículas relativamente grandes dos agregados, apresentando comportamento semelhante, em escala menor, à do “efeito de parede”, observado em amostras de concreto cujo tamanho máximo do agregado é grande em relação

Para Lo e Cui (2004), a diferença morfológica do agregado leve conduz a uma estrutura da zona de transição variável de acordo com sua localização e não tem espessura definida, atribuindo a alta porosidade na zona de transição a numerosas formações de produtos cristalinos no formato de placas de hidróxido de cálcio na vizinhança do agregado graúdo leve e também ao pobre empacotamento dos grãos de cimento (figura 3.4).

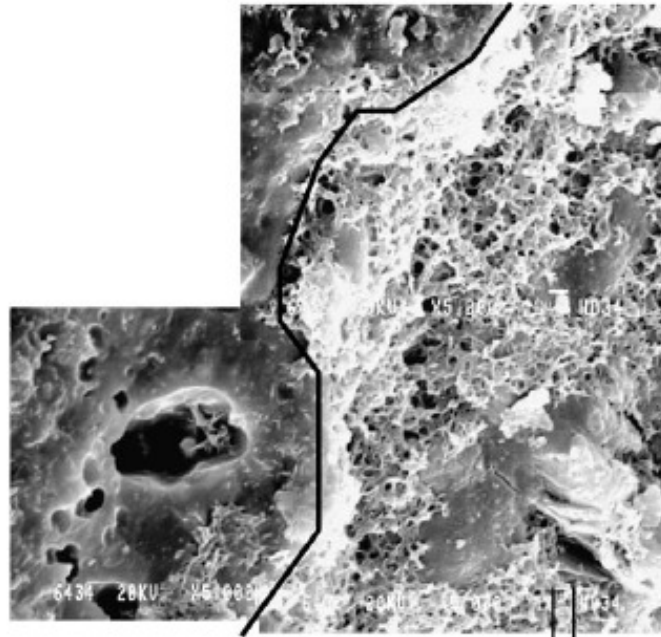


FIGURA 3.4 – Visualização da espessura da zona de transição e formação de cristais (etringita) na superfície da casca do agregado leve (LO e CUI, 2004).

Breton *et al.*, (1993) em seus estudos sobre a contribuição dos mecanismos de formação na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento observaram que a zona de transição é rica em C-H e que não possuem uma distribuição contínua ao longo da superfície do agregado. Os autores observaram ainda que estes cristais não têm uma orientação definida podendo ser paralela, perpendicular ou aleatória à parede do agregado, e que provavelmente devido a este fato, o efeito de parede não ocorra na superfície do agregado leve, além da alta porosidade e do alto teor de absorção de água, diferenciando a zona interfacial do concreto leve do concreto convencional.

Além disso, como os agregados leves são materiais porosos e com alto teor de absorção de água, a interface entre o agregado leve/pasta de cimento é compacta e caracterizada pela interconectividade mecânica em combinação com a interação química na forma de reação pozolânica (ELSHARIEF *et al.*, 2005).

3.5 Porosidade e permeabilidade

A água, sempre presente no concreto desde o início da sua produção devido à necessidade para as reações da hidratação do cimento, age também como principal componente no processo de mistura, aferindo trabalhabilidade necessária ao manuseio e aplicação do concreto. No entanto, grande parte da água de amassamento acaba evaporando pela exposição a altas temperaturas ou escoando pelas fôrmas antes do processo de hidratação se completar, deixando poros vazios ou saturados.

Essa rede de poros é um emaranhado de canais e capilares, nem sempre comunicantes entre si, mas que permitem que o concreto apresente uma certa permeabilidade aos líquidos e aos gases (PEREIRA, 2008 *apud* ANDRADE PERDRIX). A figura 3.5 mostra um modelo esquemático de uma rede de poros do concreto.

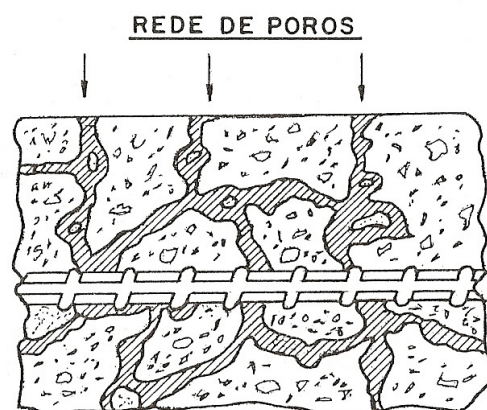


FIGURA 3.5 – Modelo simplificado da rede de poros do concreto (PEREIRA, 2008).

Além dos poros ocasionados pela perda da água, no processo de hidratação do cimento, ocorrem numerosas microfissuras provenientes das reações químicas entre os compostos do cimento e a água, que facilitam a difusão de íons através de poros preenchidos de água, denominado de difusividade, ou com a taxa de fluxo viscoso de fluidos sobre pressão através da estrutura de poros.

Para avaliação da porosidade, constituem-se fatores de sua importância não só o tamanho dos poros, mas a forma na qual eles estão dispostos na pasta de cimento, sua distribuição e interconexão (que determina a porosidade aberta).

A porosidade aberta possibilita o transporte das substâncias e caracteriza a permeabilidade da pasta; por sua vez, o tamanho dos poros interfere na velocidade de transporte de íons no interior do material.

O tamanho dos poros na pasta de cimento varia segundo diversas ordens de grandeza e eles podem ser classificados em: poros de ar aprisionado, decorrentes do processo de adensamento do concreto; poros de ar incorporados, quando usados aditivos incorporadores de ar, denominados também de macroporos; poros capilares, oriundos da saída de água livre do concreto e poros de gel, devidos à água do gel, principalmente C-S-H, tendo os dois primeiros tipos maior relevância para a durabilidade (CASCUDO, 1997). Na figura 3.6 ilustram-se os diferentes tipos de poros que podem ocorrer na pasta de cimento.

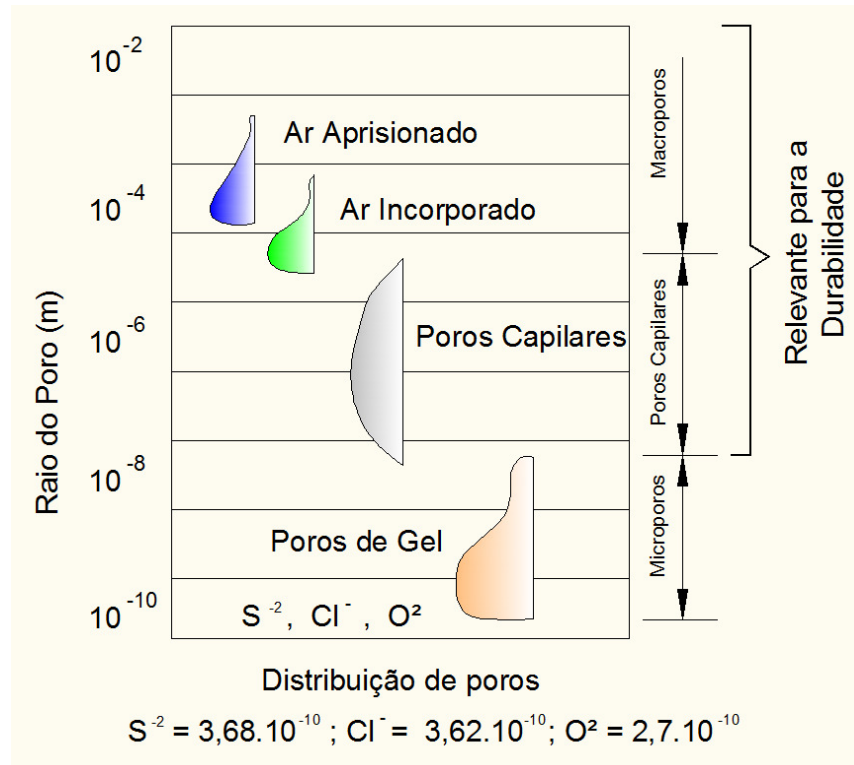


FIGURA 3.6 – Distribuição do tamanho de poros na pasta de cimento endurecida. (CASCUDO, 1997).

Newman (2005), em seu estudo sobre permeabilidade em concretos leves, relata que a permeabilidade é o principal fator que influencia a durabilidade do concreto, ressaltando que porosidade e permeabilidade não são sinônimos, visto que os poros e sua continuidade devem ser levados em consideração dentro deste contexto.

Na figura 3.7 relaciona-se a interdependência da resistência do concreto com a resistência das fases componentes, entre outros fatores. Estas fases componentes subdividem-se em matriz, zona de transição e agregado. Com base na citada figura, percebe-se que duas primeiras são diretamente dependentes do fator a/c (ou fator a /materiais cimentícios) utilizado, das adições minerais incorporadas (por adição ou substituição do cimento), e grau de hidratação, com ênfase no tempo de cura, entre outras. Tanto a relação a/c (ou fator a/mc) quanto o grau de hidratação do cimento determinam a porosidade da pasta de cimento endurecida.

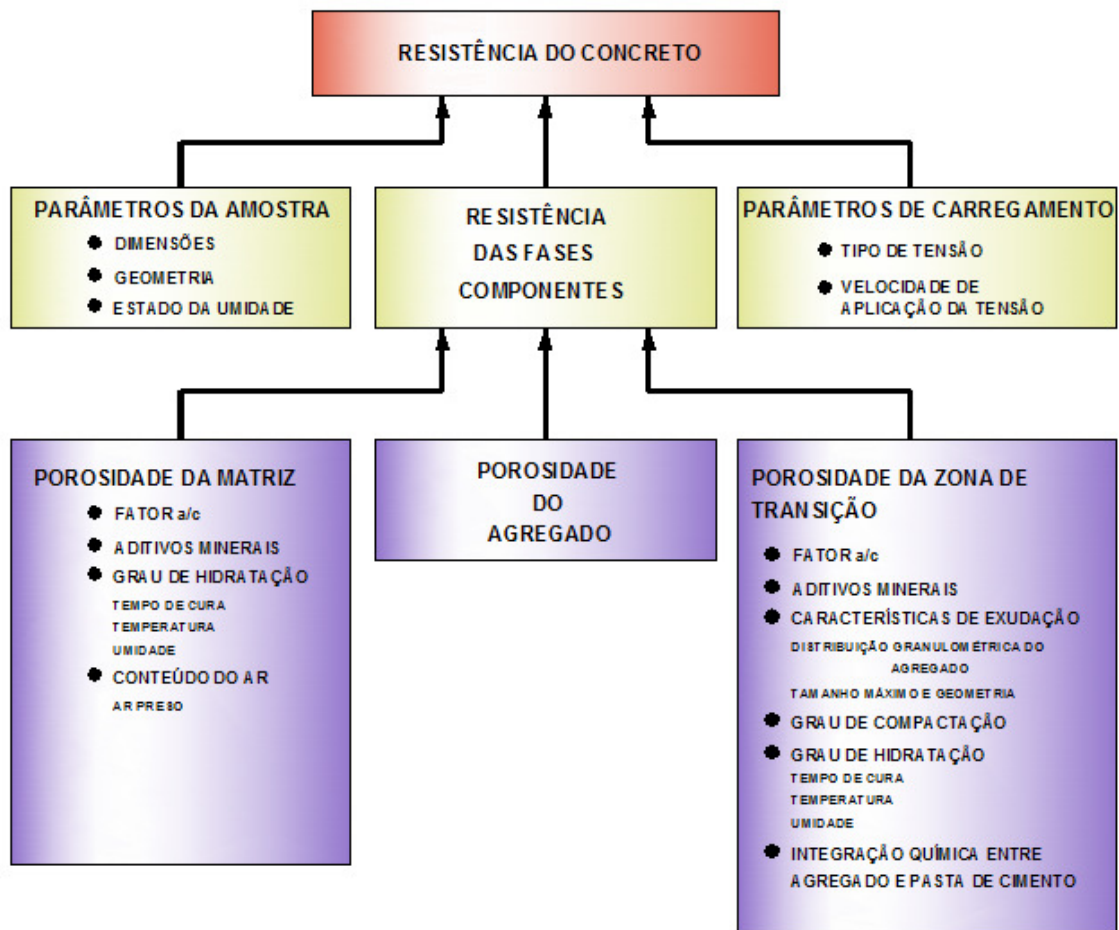


FIGURA 3.7 – Fases do concreto e sua interdependência com a resistência à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A permeabilidade, como define Garboczi *apud* Mehta e Monteiro (2008), é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso, diferentemente de difusividade, que é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso.

O movimento do fluido dentro do material só ocorre se existir alguma aplicação externa de pressão. O fluxo do fluido (q) em regime permanente, através do material, é diretamente proporcional ao produto da área (A) transversal à direção do fluxo pela diferença de pressão aplicada e, inversamente proporcional ao comprimento da trajetória do fluxo (L).

Assim, para fluxo contínuo, o coeficiente de permeabilidade (k) é calculado pela expressão de Darcy:

$$\frac{dq}{dt} = k \frac{dH.A}{L \times \mu} \quad (3.1)$$

onde:

dq/dt = taxa de fluxo do fluido

μ = viscosidade do fluxo

ΔH = gradiente de pressão

A = área da superfície

L = espessura do sólido

De forma simplista, permeabilidade também pode ser definida como a facilidade com que agentes externos, tais como fluidos, líquidos ou gases penetram e se deslocam no material, sob os mais distintos gradientes de pressão (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

O deslocamento dos elementos agressivos dentro do material depende principalmente da estrutura da pasta de cimento hidratada. Dificultando ou impedindo a entrada desses agentes agressivos no concreto através da redução da permeabilidade, aumenta-se a resistência do concreto a saturação, ataque de sulfato, ataque químico e a penetração de cloretos.

A permeabilidade da pasta tem grande influência sobre a permeabilidade do concreto e está diretamente relacionada com a relação água/cimento e com o grau de hidratação ou do tempo de cura úmida. A baixa relação água/cimento e um adequado período de cura úmida resultam em concreto com baixa permeabilidade (WHITING, 1988).

Estudos têm demonstrado que a utilização de materiais cimentícios suplementares na composição do concreto, tais como cinza volantes e, especialmente microssílica, reduzem sensivelmente a permeabilidade, principalmente quando a relação água/cimento (ou água/materiais cimentícios) é menor ou igual a 0,4 (BARRINGER, 1997).

Para Newman (2005), concretos leves não são necessariamente mais permeáveis do que o concreto convencional, visto que os poros existentes no agregado leve são circundados pela matriz cimentícia que possuem baixa fissuração na sua massa, levando-se em conta os seguintes fatores, entre outros: (a) excelente ligação (entrelaçamento) entre o agregado-matriz devido às características superficiais das partículas dos agregados leves; (b) aumento da hidratação do cimento (hidratação lenta ocasionada pela pré-saturação dos agregados) e, (c) menores efeitos do calor de hidratação.

Na figura 3.8, extraída de Lo e Cui (2004), visualiza-se o efeito de entrelaçamento entre os poros do agregado leve e a pasta cimentícia circundante.



FIGURA 3.8 – Efeito de entrelaçamento entre dos poros do agregado e a pasta cimentícia circundante (LO e CUI, 2004).

Segundo Ben-Othamn e Buenfeld (1990), testes experimentais de permeabilidade a água e cloretos realizados somente com concretos leves com resistência em amostras cúbicas variando de 88 MPa a 104 MPa mostraram que:

- a) A permeabilidade (penetrabilidade) foi baixa e independe da porosidade do agregado leve utilizado;
- b) Amostras com quantidades de cimento superior a ótima apresentaram aumento na permeabilidade.

Ainda segundo esses autores, alguns testes realizados em concretos leves com resistência à compressão entre 50 MPa e 90 MPa apresentaram valores de permeabilidade a gás oxigênio e a água um pouco menor do que os concretos convencionais.

Na tabela 3.2 (BEN-OTHTMAN e BUENFELD, 1990) apresentam-se valores de permeabilidade a água e ao gás oxigênio realizados em concretos leves e concretos convencionais e seus respectivos tipos de agregados.

TABELA 3.2 – Parâmetros relacionados à propriedade de durabilidade de concretos produzidos com alguns tipos de agregados leves e agregados normais (BEN-OTHTMAN e BUENFELD, 1990).

Tipo de agregado	Resistividade (ohm-m)	Permeabilidade a água (10^{-12} m^2)	Permeabilidade a gás oxigênio (10^{-16} m^2)
<i>Leca</i>	650	5	0,5
<i>Lytag</i>	350	5	0,4
<i>Liapor</i>	600	15	0,4
<i>Granito</i>	500	85	1,0

Uma variedade de métodos é utilizada para determinar a permeabilidade do concreto. Os métodos mais comuns são para ataques de cloretos (AASHTO T259), testes de permeabilidade a cloretos de rápida condutância elétrica (ASTM 1202), permeabilidade a água (Army Corps CRD-C163), permeabilidade ao ar (SHRP 2031), e volume ou permeabilidade a gás (ASTM C 642). Para cada método de determinação do coeficiente de permeabilidade está associada uma unidade específica.

A determinação da permeabilidade do concreto a gás é mundialmente aceita, e em termos experimentais tem sido amplamente utilizado. Neste método, o fluxo do gás é unidirecional devido a uma pressão absoluta que é aplicada numa seção transversal cilíndrica da amostra do concreto que preenche internamente a célula de pressão onde a amostra está posicionada. O coeficiente de permeabilidade a gás é calculado a partir da observação do fluxo permanente. A aplicação do gradiente de pressão (baixa e alta pressão) dentro da célula pode ser ajustado, dependendo da permeabilidade do concreto que se deseja medir (poroso ou denso) (JÖRG KROPP, 1995).

3.6 Concreto leve autoadensável

Concreto leve autoadensável é um tipo de concreto de alto desempenho desenvolvido a partir do concreto autoadensável, congregando as propriedades favoráveis do concreto leve e do concreto autoadensável.

A alta resistência mecânica com massa específica próxima a 1900 kg/m^3 e a excelente propriedade de isolante térmico, induz o concreto leve autoadensável como o mais indicado para reparos de edificações antigas, que não podem receber sobrecargas elevadas, como também na produção de elementos pré-fabricados e concretagem de estruturas monolíticas (HELA e HUBERTOVÁ, 2005).

O concreto leve autoadensável apresenta características específicas que devem ser respeitadas durante seu proporcionamento, produção e aplicação. Por estas razões, é necessário verificar as teorias aplicáveis aos concretos autoadensáveis tradicionais antes de aplicá-las aos concretos leves autoadensáveis, exigindo experiência e conhecimento profundo das propriedades individuais de cada material que o compõe, para assim, elaborar procedimentos de dosagem e produção próprios a este tipo de material.

O principal problema na produção de concretos leves autoadensáveis ressaltados por Hela e Hubertová (2005), é a identificação do agregado leve que seja mais apropriado para este uso, tendo em conta as suas propriedades

específicas, tais como elevada absorção de água sob pressão atmosférica e, em caso de bombeamento, sob alta pressão.

Além disso, a baixa massa específica do agregado leve contribui de forma desfavorável sua adequação aos métodos de dosagem usualmente aplicados para os concretos autoadensáveis convencionais, e especialmente, na caracterização das propriedades reológicas através de ensaios específicos.

De acordo com investigações correntes sobre concreto leves e como sugere o EFNARC (2002), os ensaios utilizados para avaliação da resistência à segregação dos concretos leves autoadensáveis devem estar associados com método da observação visual como também da verificação da uniformidade na distribuição do agregado na massa cimentícia. Assim, tomando como base os preceitos dos pesquisadores acima relatados, não existem diferenças significativas entre os métodos de dosagem propostos para o concreto autoadensável convencional e o concreto leve autoadensável, exceto com relação ao tipo de agregado utilizado.

Atualmente não existe um padrão europeu que defina os métodos e propriedades através de testes de concretos autoadensáveis. Os principais centros de desenvolvimento deste tipo de concreto elaboraram diferentes diretrizes, mas estas não foram unificadas e, desta forma, diferentes métodos são utilizados até agora. Um das tentativas de unificar os procedimentos europeus para a concepção e ensaio de concretos autoadensáveis foi publicado pela EFNARC (2002). Neste documento normativo incluem-se os métodos de ensaios e dispositivos necessários a realização destes testes.

Esta organização trabalha com base nos conceitos europeus adotados no CEN e de publicações que resumem, principalmente, o conhecimento de especialistas japoneses e britânicos envolvidos no ramo da tecnologia do cimento.

Assim, um documento normativo com objetivo de unificar os métodos de ensaios nos países da União Européia foi elaborado de forma a orientar esta comunidade com relação aos testes a serem realizados, incluindo a metodologia dos ensaios e dimensões dos dispositivos utilizados, além da classificação do concreto autoadensável com relação os valores dos parâmetros medidos. Além disso, os

especialistas pretendem propor uma norma única para os concretos autoadensáveis, ou mais provavelmente, elabora um anexo a atual Norma Européia (EN 206, 2010).

Na tabela 3.3, extraída de Hela e Hubertová (2005), visualiza-se os testes e a descrição das propriedades analisadas através destes ensaios, para os concretos autoadensáveis, sugerindo ainda que estes ensaios podem ser aplicados aos concretos leves autoadensáveis.

TABELA 3.3 – Ensaios para concretos autoadensáveis e propriedades analisadas (HELA e HUBERTOVÁ, 2005).

Ensaio	Propriedade Analisada
Slump test	Mobilidade, fluidez
Anel J	Resistência ao bloqueio
Caixa L	Mobilidade, resistência ao bloqueio, segregação dos grãos do agregado graúdo
Orimet	Velocidade de escoamento, mobilidade
Orimet + anel J	Mobilidade, resistência ao bloqueio
Funil V	Mobilidade
Caixa U	Mobilidade, segregação, exsudação
Caixa preenchida	Resistência ao bloqueio
GMT	Resistência à segregação

Para Wu *et al.* (2009), os vários testes avaliativos usados para concreto leve autoadensáveis são similares aos usados para os concretos autoadensáveis convencionais. Khayat *et al.* (2004) fazem referência aos ensaios da caixa L, caixa U e anel J como os ensaios que podem ser utilizados para avaliar a habilidade passante do concreto autoadensável e, quando combinados com o ensaio de *slump flow*, são também apropriados para avaliar a deformabilidade e resistência à segregação.

Choi *et al.* (2006) desenvolveram um método de dosagem para concreto leves autoadensáveis aplicando o método modificado proposto por Su e Miao (2003),

adotando os testes de *slump flow*, funil V e caixa U como ensaios específicos utilizados para avaliar a trabalhabilidade do concreto leve autoadensável.

De maneira similar, Shi e Wu (2005), utilizaram-se dos ensaios de *slump flow*, funil V, caixa L e o método da observação visual para análise destes tipos de concreto.

Müller e Haist (2002) propuseram três misturas de concretos leves autoadensáveis e asseguraram que a propriedade de autoadensabilidade, analisada através dos ensaios *slump flow*, anel J, funil V e caixa L, adéquam-se perfeitamente a este tipo de concreto. Para o ensaio de *slump flow test* os autores consideraram, como parâmetro para medição da fluidez do concreto, o tempo em que o concreto levou para espalhar-se em placa metálica até atingir o diâmetro de 500 mm.

3.7 Estudos recentes sobre concretos leves autoadensáveis

- **TOPÇU e UYGUNOĞLU (2010)**

Estes pesquisadores analisaram o efeito de diferentes tipos de agregados leves nas propriedades físicas e mecânicas de concretos leves autoadensáveis no estado fresco e endurecido, e, para análise comparativa, um concreto autoadensável com agregado graúdo de pedra britada também foi confeccionado.

Para fabricação dos concretos leves autoadensáveis, os autores utilizaram três tipos de agregados leves (pedra-pomes, turfa vulcânica e diatomita) associados a um agregado miúdo natural (areia), adições minerais e aditivo superplastificante a base de policarboxilato (SP). Utilizaram-se, como adições minerais, a cal e a cinza volante, no intuito de aumentar a habilidade de escoamento (fluidez) e neutralizar o fenômeno de segregação dos agregados leves.

Embora o foco principal do estudo fossem as propriedades mecânicas do concreto, os autores realizaram o ensaio de espalhamento através do *slump flow test* para medição do diâmetro de espalhamento dos concretos no estado fresco,

observando um incremento na lubrificação entre as partículas finas à medida que aumentava a relação água/materiais finos.

Na figura 3.9, ilustram-se os valores do diâmetro de espalhamento, em mm, das formulações estudadas para as diferentes relações água/materiais finos com os respectivos agregados utilizados.

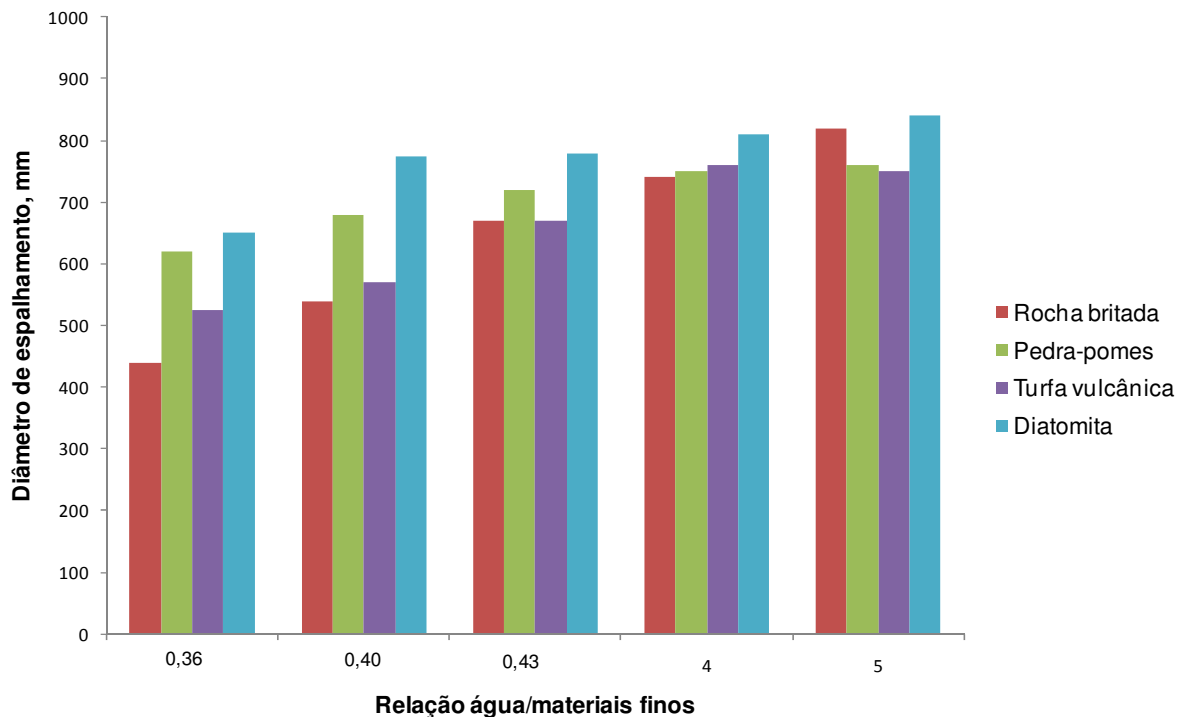


FIGURA 3.9 – Valores dos diâmetros de espalhamento para diferentes relações água/materiais finos dos concretos autoadensáveis e respectivos tipos de agregados (TOPÇU e UYGUNOĞLU, 2010).

Os pesquisadores observaram que o maior diâmetro de espalhamento ocorreu para os concretos leves produzidos com diatomita, independentemente da relação água/materiais finos, atribuindo este evento ao fato da massa específica da diatomita ser maior do que a massa específica dos agregados de pedra-pomes e turfa vulcânica. Para as propriedades do concreto no estado endurecido, chegaram às seguintes conclusões:

- ✓ Comparando-se a densidade dos concretos leves autoadensáveis de pedra-pomes, turfa e diatomita, com o concreto autoadensável com agregado de

pedra britada, houve uma redução de 30-35 %, 22–31% e 34–38%, respectivamente;

- ✓ A substituição do agregado convencional pelo agregado leve resultou numa redução da resistência à compressão dos concretos, independente da relação água/materiais finos;
- ✓ Com o aumento da relação água/materiais finos, os módulos de elasticidade dos concretos decresceram substancialmente. Houve também uma redução dos módulos dos concretos leves comparados ao concreto autoadensável convencional.

- **MAGHSOUDI e MOHAMAD Pour (2009)**

Nesta pesquisa, desenvolveram-se estudos de dosagens em diferentes misturas de concreto leve autoadensável, com uso de agregados de argila expandida (LECA), através do método de tentativas e erros, objetivando encontrar valores de *slump flow*, caixa L, funil V e resistência à compressão aos 28 dias, em consonância com as normas internacionais. Com base nos resultados obtidos, o melhor traço foi selecionado para maiores investigações das propriedades mecânicas, como resistência à compressão e módulo de elasticidade, entre outras.

Para elaboração dos traços, os autores ressaltam sobre a necessidade da inclusão de materiais pulverulentos e aditivos modificadores de viscosidade na produção dos concretos autoadensáveis, assim como para a fabricação dos concretos leves autoadensáveis.

O estudo experimental foi efetuado para entender as propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável com adição de agregados leve (LECA), além da elaboração de metodologia para o concreto leve autoadensável, utilizando-se para isso o cimento Portland tipo II, agregado leve com dimensão máxima de 9,5 mm e areia bem graduada. Um aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico e microssílica (material pulverulento) também foi adicionado à mistura.

A microssílica foi adicionada na proporção de 10% em substituição ao cimento. Os resultados dos ensaios para análise das propriedades reológicas, em duas misturas estudadas, estão apresentados na tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Resultados dos ensaios do concreto leve autoadensável no estado fresco (MAGHSOUDI e MOHAMAD Pour, 2009).

Dosagens	<i>Slump flow</i> (mm)	Anel J (segundos)	Funil V (segundos)	Caixa L (H2/H1)
SL-1	720	1,2	5,0	0,85
SL-2	670	1,5	5,5	0,83

Aos 28 dias, os concretos apresentaram resistência à compressão axial de 20,8 MPa e 28,5 MPa, nas misturas com 400 kg/m³ (SL-1) e 500 kg/m³ (SL-2) de cimento, respectivamente. Os módulos de elasticidade ficaram compreendidos entre 13,5 GPa (SL-1) e 16,4 GPa (SL-2), também determinados aos 28 dias.

Os autores finalizam a pesquisa concluindo que o uso de concretos leves autoadensáveis pode melhorar as propriedades mecânicas e características de durabilidade das estruturas de concreto confeccionadas com agregados leves do tipo LECA.

- **WU *et al.* (2009)**

Seguindo a mesma linha de estudo, Wu *et al.* (2009) ressaltam que numerosas investigações têm sido conduzidas para concreto autoadensável e concreto leve, mas há poucos estudos que tratam sobre o comportamento de concreto leve autoadensável. A respeito disso, conduziram estudos objetivando procedimentos de dosagens para concretos leves autoadensáveis. Os experimentos consistiram em medir a estabilidade dinâmica e estática de duas misturas de concreto no estado fresco, denominados SCLC 1 e SCLC 2.

Para análise da estabilidade dinâmica, os pesquisadores utilizaram-se dos testes do *slump flow*, funil V, caixa L e caixa U, tomando como referência os valores prescritos pelo EFNARC (2002).

Para análise da estabilidade estática, adotaram três tipos de ensaios práticos de fácil execução e que não requerem aparatos sofisticados, denominados de teste de segregação úmida, teste de resolução de superfície e teste de uniformidade de distribuição do agregado graúdo leve.

As propriedades de resistência à compressão e massa específica seca também foram determinadas. O concreto SCLC 1 atingiu, aos 28 dias, a resistência de 42,6 MPa com massa específica de 1875 kg/m³. O concreto SCLC 2 de massa específica seca de 1920 kg/m³, também aos 28 dias, obteve uma resistência de 50,1 MPa.

Face aos resultados obtidos, os pesquisadores definiram que os concretos analisados podem ser considerados como concreto leve de alta resistência, e quanto ao estado fresco, apresentaram boa trabalhabilidade, demonstrada através dos ensaios de estabilidade dinâmica e estática, com boa uniformidade na distribuição dos agregados leves na massa cimentícia, sem apresentar segregação ou exsudação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o alcance dos objetivos deste trabalho foram desenvolvidas duas etapas de estudos experimentais. A primeira consistiu na seleção dos materiais constituintes das misturas, elaboração do proporcionamento dos materiais para concreto estrutural leve (CEL), produção dos concretos leves com dois tipos de argila expandida como agregado graúdo e determinação das propriedades dos concretos no estado fresco e endurecido.

A metodologia usada para elaboração da dosagem inicial para concreto estrutural leve foi baseada nas proposições da norma americana ACI 211.2-98 (1998), verificando-se sua validade através das propriedades físicas e mecânicas. As dosagens estudadas tiveram variações, em termos percentuais, da quantidade de cada tipo de argila expandida (AE-0500 e AE-1506) presente nas misturas, em massa, mantendo-se constante a quantidade de cimento, areia, relação água/cimento (a/c) e cimento/materiais secos (c/ms). Não foi utilizado nenhum tipo de aditivo ou adição nesta etapa do trabalho.

Na segunda etapa, após identificação da formulação de melhor desempenho das três formulações inicialmente pesquisadas, fez-se uma adequação ao traço eleito incluindo-se adições minerais (metacaulim e cinza de biomassa de cana de açúcar) e aditivos plastificantes e superplastificantes, objetivando seu uso como concreto estrutural leve autoadensável (CELA).

Para o traço inicial da segunda etapa da pesquisa, foi adicionado somente aditivo plastificante na mistura do concreto leve para verificação de sua adequação como autoadensável.

Dentro dessa linha de pesquisa e após confirmação das características como concreto estrutural leve autoadensável, através de ensaios específicos (funil “V”, caixa “L” e *slump-flow test*), conforme exigências técnicas nacionais (NBR 15823, 2010) elaboraram-se mais quatro traços com inclusão de aditivos e adições minerais, com especial atenção ao uso da cinza de biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim, em substituição parcial ao cimento, introduzidos visando atuar como

micro-reforço. Novamente, para estas novas formulações, foram realizados os três ensaios específicos acima citados, alterando-se a porcentagem de aditivos visando sua adequação como concreto autoadensável, resultando numa menor tendência de exsudação e viscosidade ao concreto, e conseqüentemente maior trabalhabilidade.

Com relação à adição de materiais finos utilizados na segunda etapa (produção de concreto leve autoadensável), almejando-se fluidez e coesão da massa cimentícia, optou-se por utilizar metacaulim e cinza de biomassa da cana-de-açúcar. O metacaulim por ter eficiência comprovada como material pozolânico em diversas pesquisas da área (ROSSIGNOLO e OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA, 2007; CARMO e PORTELLA, 2008 e FERREIRA *et al.*, 2003), e a cinza de biomassa com base no potencial de uso como material pozolânico, como sugerem Anjos (2009), Cordeiro (2006) e Ganesan *et al.* (2007), além de promover uma pesquisa tecnológica inovadora e com contribuição ambiental.

A avaliação dos concretos leves e da influência das adições minerais (metacaulim e cinza de biomassa de cana-de-açúcar) nas propriedades das formulações dos concretos estruturais leves autoadensáveis foi comprovada através dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 1, 7, 28 e 91 dias, absorção de água por imersão e capilaridade, módulo de deformação dinâmico através de aparelho de ultrassom, permeabilidade a gás nitrogênio, fluorescência de raios-X, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, além dos ensaios físicos complementares de caracterização, tais como: massas específicas das amostras no estado fresco e endurecido, porosidade total e índices de vazios. Os ensaios foram realizados no Laboratório do Departamento de Química da UFRN (LabCim), no Laboratório de Construção Civil (IFRN), no Laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos (IFRN) e no Laboratório da empresa CTGás. Todos localizados na cidade de Natal/RN.

Na tabela 4.1 ilustram-se de forma detalhada os ensaios específicos adotados para caracterização dos concretos analisados nesta pesquisa.

TABELA 4.1 – Ensaios realizados nos concretos CEL e CELA.

ENSAIOS		CEL	CELA	NORMA
FRESCO	Abatimento do tronco de cone	X	-	NBR NM 67 (1998)
	<i>Slump flow test</i>	-	X	NBR 15823 (2010)
	Funil V	-	X	NBR 15823 (2010)
	Caixa L	-	X	NBR 15823 (2010)
	Teor de Ar Incorporado	-	X	NBR NM 47 (2002)
	ME Fluida	X	X	-
ENDURECIDO	Evolução das Massas Específicas Saturadas	X	X	NBR 9776 (2005)
	Evolução do Módulo de Elasticidade Dinâmico (condição superfície seca saturada - SSS)	X	X	NBR 15630 (2008)
	Resistência à compressão axial	X	X	NBR 5739 (1994)
	ME da amostra: SECA, SATURADA e REAL	X	X	NBR 9778 (2005)
	Absorção por imersão	X	X	NBR 9778 (2005)
	Absorção por capilaridade	X	X	NBR 9779 (1995)
	Índice de vazios	X	X	NBR 9778 (2005)
	Porosidade total	X	X	-
MICROESTRUTURAIS	Fluorescência (FRX)	-	X	-
	Difração de Raio X (DRX)	-	X	-
	Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV)	-	X	-
ESPECIAIS	Permeabilidade a gás nitrogênio	X	X	-

Na figura 4.1 e figura 4.2 ilustra-se o fluxograma individualizado das etapas 1 e 2, respectivamente. Vale ressaltar que os materiais caracterizados na etapa 1 e que tiveram uso na etapa 2, foram caracterizados apenas uma única vez por fazerem parte de um mesmo lote de coleta de amostras.

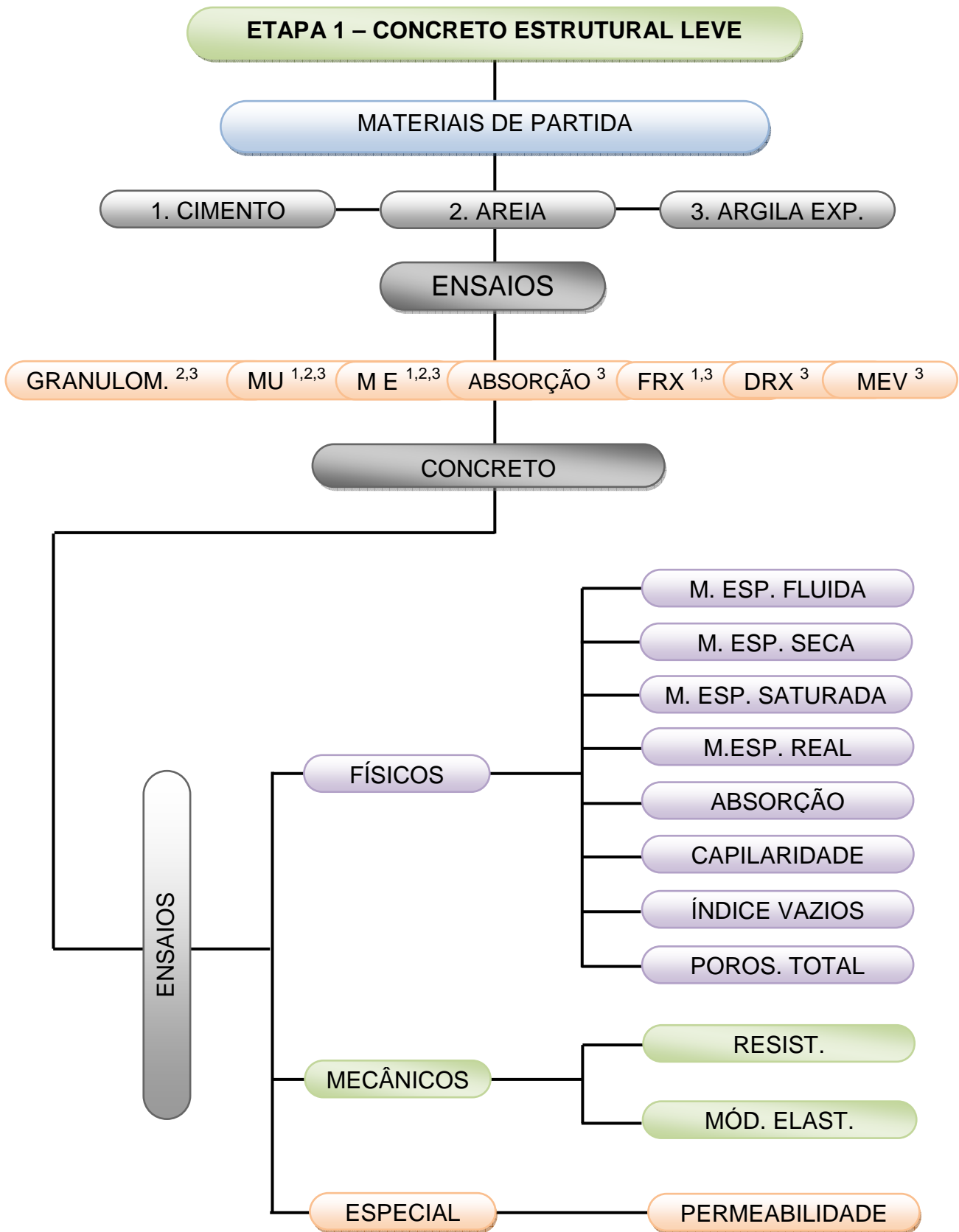


FIGURA 4.1 – Fluxograma do programa experimental – PARTE 1: CONCRETO ESTRUTURAL LEVE (CEL).

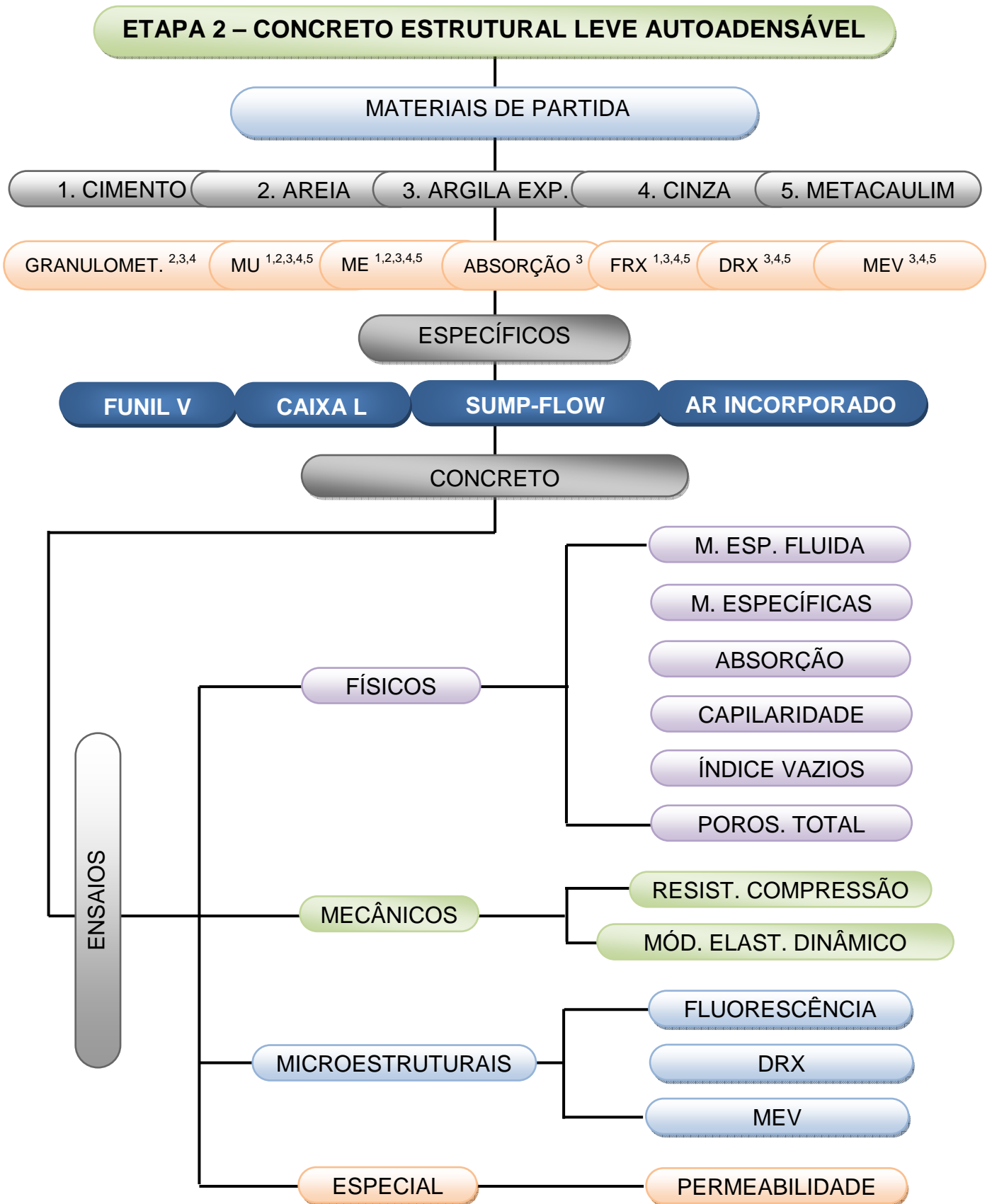


FIGURA 4.2 – Fluxograma do programa experimental – PARTE 2: CONCRETO ESTRUTURAL LEVE AUTOADENSÁVEL (CELA).

4.1 Materiais de partida: características

Para realização deste trabalho, foi feito um levantamento no qual se observou os tipos de materiais mais utilizados e disponíveis no mercado na região metropolitana de Natal-RN e adjacências, com exceção para as argilas expandidas, que são oriundas da cidade de São Paulo.

Assim, os materiais selecionados e utilizados no estudo experimental foram os seguintes:

- Cimento: cimento Portland composto CP-II Z 32 RS;
- Cinza de biomassa da cana-de-açúcar: coletada em depósito a céu aberto no pátio de descarga de limpeza dos fornos da Usina Estivas localizada no município de Arêz/RN, proveniente do processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar como co-gerador de energia na produção de açúcar e álcool;
- Metacaulim: pozolana de alta reatividade que substitui com vantagens a sílica ativa, sendo utilizada como adição mineral às aplicações de cimento Portland, otimizando seu desempenho e doada por fabricante da cidade de Recife-PE;
- Agregados graúdos: dois tipos distintos de graduação de argilas expandidas, comercialmente conhecidas como argila expandida 0500 e argila expandida 1506, aqui nominadas de AE-0500 e AE-1506, respectivamente;
- Agregado miúdo: areia natural quartzosa oriunda do distrito de Pium (Parnamirim/RN);
- Aditivos: plastificante à base de lignosulfonato e superplastificante à base de éter policarboxílico;
- Água potável: obtida diretamente da concessionária local.

4.1.1 Cimento

Na produção do concreto estrutural leve (etapa 1) e concreto estrutural leve autoadensável (etapa 2) empregou-se o cimento Portland composto (CP-II Z 32 RS).

Esse tipo de cimento composto apresenta pequenos teores de aluminato tricálcico (C_3A), interferindo positivamente na reação álcali-agregado além da redução de fissuras devido à retração. A adição de material pozolânico e carbonático na sua composição apresenta a vantagem de conferir maior impermeabilidade e resistência aos agentes agressivos às misturas garantindo maior durabilidade.

Na tabela 4.2 apresentam-se as características e propriedades desse cimento, conforme informações técnicas fornecidas pelo fabricante.

TABELA 4.2 – Características e propriedades do cimento CP-II Z 32 RS.

Características e Propriedades		Valores	Unidades	Norma
Propriedades Químicas	MgO	2,13	%	PO 00435
	SO ₃	2,84	%	PO 00435
	CaO livre	1,58	%	NBR NM 14
	CO ₂	4,56	%	-
	Equiv. Alcalino em Na ₂ O	1,12	%	-
	(0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)			
	Perda ao fogo	5,56	%	NBR NM 18
	Resíduo Insolúvel	9,87	%	NBR NM 15
Finura	Resíduo # 200	3,9	%	NBR 12826
	Resíduo # 325	18,7	%	NBR 12826
	Sup. Esp. (Blaine)	4180	cm ² /g	NBR NM 76
Tempo de Pega	Início	2:50	h:min	NBR NM 65
	Fim	4:00	h:min	NBR NM 65
Resistência à Compressão	3 dias	25,9	MPa	NBR 7215
	7 dias	35,3	MPa	NBR 7215
	28 dias	43,7	MPa	NBR 7215

Fonte: Informações do fabricante conforme relatório referente ao lote do cimento (abril/2008).

4.1.2 Cinza de biomassa de cana-de-açúcar

A cinza de biomassa, proveniente do resíduo de queima do bagaço de cana-de-açúcar da indústria sucroalcooleira tem despertado interesse devido sua disponibilidade crescente no mercado nacional e por se apresentar como fonte suplementar de aditivo mineral para a produção de materiais cimentícios. Anjos (2009), em seu estudo, confirmou a adequação da cinza de biomassa, utilizada nesta pesquisa, como pozolana artificial da classe E, atendendo as exigências estabelecidas pela NBR 12653 (1992), quando finamente moída.

A adição da cinza da cana-de-açúcar no concreto leve autoadensável tem como objetivo substituir parte do cimento, visando melhorias na trabalhabilidade, maior empacotamento das partículas finas (cimento e metacaulim) e, conseqüentemente, aumento ou manutenção da resistência e durabilidade do concreto. Enfatiza-se a redução da emissão de CO₂ no processo de fabricação do cimento e destinação de resíduo sem reaproveitamento.

A cinza utilizada no desenvolvimento desta pesquisa foi coletada diretamente de depósito a céu aberto no pátio de descarga da limpeza dos fornos da Usina Estivas, localizada no município de Arêz no Rio Grande do Norte. A coleta do material se deu de forma aleatória, retirando amostras de várias partes do monte do resíduo (base, meio e topo do monte). Este resíduo é proveniente do processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar usado como co-gerador de energia elétrica (figura 4.3).

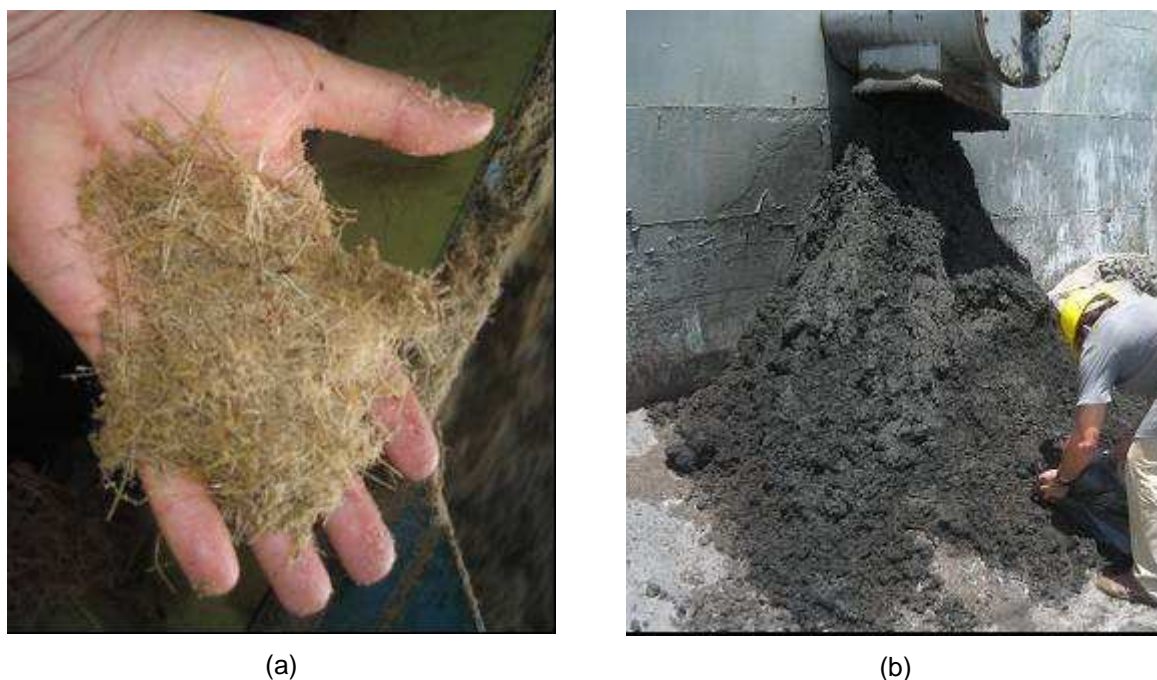


FIGURA 4.3 – Bagaço da cana-de-açúcar usado como combustível (a) e coleta da cinza (b).

Após a coleta das amostras, estas foram encaminhadas ao Laboratório de Construção Civil do IFRN e secas em estufa a temperatura de 105° C. Depois de seca, a cinza foi homogeneizada e submetida ao processo de moagem e peneiramento.

O processo de moagem a seco se deu em um moinho rotativo de bolas esféricas metálicas durante o período de três horas, realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais da UFPB, objetivando aumento de sua reatividade como material pozolânico.

A tabela 4.3 especifica a quantidade de corpos moedores e suas respectivas massas, necessários para moer uma carga de 2 kg de material.

TABELA 4.3 – Quantidades de corpos moedores utilizados no processo de moagem (ANJOS, 2009).

Diâmetro (mm)	Massa (g)	Quantidade
20	33,75	160
25	62,10	100
30	125,00	40
40	275,00	16

Após o processo de moagem, a amostra foi novamente homogeneizada e passada pela peneira com abertura de 75 μm (malha 200 *mesh*). O material que não passou pela peneira foi considerado como resíduo e, portanto, descartado. Após peneiramento de uma quantidade suficiente para realização dos ensaios, a amostra foi novamente seca mantida em estufa (105° C) até a sua utilização como adição mineral nos concretos autoadensáveis (figura 4.4).

**FIGURA 4.4** – Imagem da cinza de biomassa de cana-de-açúcar.

Para análises químicas, pequenas porções da cinza foram armazenadas em cápsulas plásticas hermeticamente fechadas para posterior caracterização (FRX, DRX e MEV).

Para a realização da análise granulométrica foi utilizada a técnica de classificação de partículas por difração a laser. O equipamento utilizado foi um Granulômetro à laser modelo 920L, Cilas, existente no Laboratório de Cerâmica e Metais Especiais da UFRN. No processo de dispersão das partículas da amostra, utilizou-se 2 g de amostra para 2 mL de detergente neutro em 10 mL de água destilada. A dispersão se deu no tempo de 60 segundos em ultrassom.

4.1.3 Metacaulim

O Metacaulim, obtido através do processo de queima controlada de argila caulínica, de alta pureza, composto de sílica e alumina no estado amorfo, possui alta reatividade quando em contato com o hidróxido de cálcio (CH) presente na pasta de cimento Portland, formando um hidrosilicato de cálcio (C-S-H) e um hidroaluminosilicato de cálcio. Devido a este efeito pozolânico, acaba por reduzir a porosidade e o teor de hidróxido de cálcio na matriz do cimento, contribuindo para o aumento da resistência à compressão e durabilidade do concreto influenciando na qualidade da zona de transição agregado-matriz. A amostra de metacaulim estudada nesta pesquisa é proveniente da calcinação de argilas caulínicas, e encontra-se comercialmente disponível no mercado brasileiro.

4.1.4 Agregados graúdos – argila expandida

As argilas expandidas utilizadas como agregado graúdo leve nesta pesquisa foram produzidas pelo processo de forno rotativo a temperaturas médias de 1100 °C utilizando a argila como matéria prima, fabricada por empresa nacional, em duas graduações e, nominadas neste trabalho, de AE-0500 ($D_{máx} = 4,8$ mm) e AE-1506 ($D_{máx} = 19$ mm) (Figura 4.5).



(a)



(b)

FIGURA 4.5 – Argilas expandidas utilizadas no estudo: AE-0500 (a) e AE-1506 (b).

As argilas expandidas utilizadas em substituição do agregado graúdo natural foram caracterizadas, quanto à granulometria, em conformidade com o prescrito pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). A norma NBR 7211 (ABNT, 2005), especifica os limites da composição granulométrica para o agregado graúdo constantes na tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (NBR 7211, 2005).

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ¹⁾				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ²⁾	87 – 100	-
19 mm	-	2 - 15 ²⁾	65 ²⁾ – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 - 5	40 ²⁾ - 65 ²⁾	95 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15 ²⁾	80 ²⁾ – 100	80 ²⁾ – 100	-	-
6,3 mm	40 ²⁾ – 65 ²⁾	92 – 100	95 – 100	-	-
4,75 mm	80 ²⁾ – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

Notas

- 1 Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.
- 2 Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

4.1.5 Agregado miúdo – areia natural quartzosa

Utilizou-se a areia natural quartzosa oriunda do distrito de Pium, localizado no município de Parnamirim/RN. A areia natural, aqui denominada de agregado miúdo, foi caracterizada, quanto à granulometria, em conformidade com o prescrito pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2005), devendo atender ao limites das zonas indicadas na tabela 4.5. A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) enfatiza que podem ser utilizados como agregado miúdo para concreto com distribuição granulométrica diferente das zonas estabelecidas, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade.

TABELA 4.5 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211, 2005).

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Notas

- 3 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 4 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 5 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

4.1.6 Aditivos

Os aditivos, elementos de fundamental importância para o desempenho do CAA, têm a capacidade de alterar as propriedades do mesmo no estado fresco e endurecido. Apesar de estarem divididos em várias categorias, os aditivos carregam em si dois objetivos fundamentais, o de ampliar as qualidades de um concreto, ou de minimizar seus pontos fracos, podendo ser classificados em sais minerais, ácidos orgânicos, resinas, tensoativos, dispersantes, umectantes e emulsionantes. Destaca-se seu uso quando objetiva-se obter concreto mais fluido ou simplesmente visando diminuição do fator água/cimento.

Os plastificantes funcionam de modo semelhante aos superplastificantes, cuja diferença é quanto à intensidade da ação: enquanto o plastificante reduz no mínimo 6% da água de amassamento, o superplastificante reduz em até 12%, dependendo do fabricante.

Para o estudo foram utilizados os aditivos Glenium 218 (superplastificante) e o Mastermix 390N (plastificante). Na tabela 4.6 descrevem-se os dados técnicos dos aditivos conforme informações do fabricante.

TABELA 4.6 – Características técnicas dos aditivos Glenium 51 e Mastermix 360N.

ADITIVO	GLENIUM 218	MASTERMIX 390N
Base química	Éter Policarboxílico	Lignosulfonato
Aspecto	Líquido	Líquido
Cor	Branco turvo	Castanho escuro
pH	5 - 7	7 - 9
Densidade	1,067 – 1,107 (g/cm ³)	1,155 – 1,195 (g/cm ³)
Sólidos	34 – 37 (%)	34 – 38 (%)
NBR 11768	Tipo P e SP	Tipo P
ASTM C 494	Tipo A e F	Tipo A

4.2 Dosagem e produção dos concretos

4.2.1 Dosagem e produção dos concretos estruturais leves (CEL)

Frente às diversas metodologias de dosagens, raras são as que se destinam a concreto leve. No entanto, diversos autores fizeram adaptações das metodologias existentes para concretos convencionais para concretos leves (SILVA, 2007; ROSSIGNOLO, 2003; MORAVIA, 2007; MAYCÁ *et al.*, 2009). Nesta pesquisa optou-se por adotar a metodologia prescrita pela norma ACI 211.2-98, específica para o cálculo de dosagem de concretos estruturais leves. A adoção deste método deve-se ao fato de não ter norma ou metodologia brasileira específica para concreto leve e também pela experiência adquirida no acompanhamento e desenvolvimento do trabalho de Pereira (2008).

A substituição dos agregados tradicionais pelos agregados leves na dosagem do concreto requer um estudo mais elaborado e cuidadoso do proporcionamento dos materiais constituintes, uma vez que a maior dificuldade deve-se ao fato de que estes agregados apresentam menor massa específica e maiores absorções de água em comparação aos agregados tradicionais.

Geralmente, nos métodos empíricos de dosagem de concretos convencionais, sugere-se a percentagem de argamassa (cimento e areia) compreendida na faixa de 49% a 54%, podendo ocorrer variações em função do tipo dos materiais e suas propriedades. Para o concreto estrutural leve, após sucessivos ensaios de traços e pesquisas bibliográficas específicas sobre o tema, ficou estabelecida, como orientação preliminar, que a percentagem de argamassa adequada para formulações de concretos estruturais leves, necessária para proporcionar trabalhabilidade próxima ao concreto convencional, é de aproximadamente 65%.

Para o consumo de cimento, de uma forma geral, os documentos normativos nacionais e internacionais indicam valores acima de 300 kg/m³, como forma de assegurar os níveis mínimos de resistência à compressão e durabilidade, necessários para classificação como concreto estrutural.

Seguindo-se os procedimentos adotados pela norma do ACI 211.2-98, dois métodos de dosagem podem ser empregados: em peso, quando se utiliza uma combinação de agregados graúdos leves e agregados miúdos naturais, ou em volume, que faz uso de ambos os tipos de agregados leves.

Para o trabalho aqui desenvolvido, devido à utilização de agregado graúdo leve (argilas expandidas) e agregado miúdo natural (areia), foi empregado o método de dosagem em peso.

A seguir, serão apresentadas as etapas com suas respectivas tabelas, extraídas do ACI 211.2-98, que resumem o método de dosagem empregado. Cabe salientar que todas as tabelas presentes na norma americana, necessárias para desenvolvimento do método, foram adaptadas com a conversão das unidades para o Sistema Internacional.

Etapa 1: primeiramente, estima-se o *slump* pretendido em função do tipo de construção (peça estrutural) a ser executada, de acordo com a tabela 4.7

TABELA 4.7 - Valores de *slump* pretendidos em função do elemento estrutural a ser concretado (ACI 211.2-98).

Elemento estrutural	<i>Slump</i> , em mm	
	Máximo	Mínimo
Vigas e Reforço em paredes	100	25
Pilares e colunas	100	25
Lajes	75	25

Etapa 2: em seguida, a norma ACI 211.1-98 especifica que a escolha do agregado graúdo leve deve ter dimensão máxima característica de 9,5 mm, 12,5 mm ou 19 mm.

Etapa 3: a tabela 4.8 estima a quantidade de água de amassamento por unidade de volume do concreto (sem ar incorporado). A tabela citada também faz referência a valores estimativos de vazios (ar aprisionado), em percentagem, presentes após a mistura.

TABELA 4.8 – Quantidade de água em função da dimensão máxima do agregado e *slump* pretendido para concreto sem ar incorporado (ACI 211.2-98).

Quantidade de Água, kg/m ³ .			
Variação do Slump, em mm.	9,5 mm	12,5 mm	19 mm
25 a 50	208	199	187
75 a 100	228	217	202
125 a 150	237	222	208
Valores aproximados, em porcentagem, de vazios presentes na mistura	3,0	2,5	2,0

Etapa 4: neste item, definem-se valores aproximados da relação água/cimento (*a/c*). Esta relação *a/c* não é baseada somente pela resistência requerida do concreto como também por fatores como durabilidade e propriedades finais, uma vez que o uso de diferentes tipos de agregados e de cimento, geralmente, resulta em diferentes resistências para uma mesma relação água/cimento. Desta forma, a tabela 4.9 apresenta valores aproximados e relativamente conservadores de relação água/cimento (*a/c*) adotados para concretos produzidos com cimento Portland do tipo I, em função da resistência do concreto à compressão, produzido sem ar incorporado.

TABELA 4.9 – Estimativa da relação água-cimento (*a/c*) em função da resistência à compressão requerida do concreto (ACI 211.2-98).

Estimativa da relação água-cimento (<i>a/c</i>)	
Resistência à compressão aos 28 dias, em MPa	<i>a/c</i>
42	0,41
35	0,48
28	0,57
21	0,68
14	0,82

Etapa 5: nesta etapa, calcula-se a quantidade de cimento por unidade de volume de concreto (kg/m^3), em conformidade com as determinações feitas nas etapas 3 e 4. A quantidade de cimento necessária (C) é igual à quantidade de água de amassamento (A) estimada para a mistura (etapa 3) dividido pela relação a/c (etapa 4), conforme equação 4.1. Nesta etapa a norma deixa a possibilidade de alterar o valor encontrado, tomando como base critérios que eleve a resistência e durabilidade do concreto obtido.

$$C = (A) / (a/c) \quad (4.1)$$

Etapa 6: A estimativa do volume de agregado graúdo seco solto, por unidade de volume de concreto, em função da dimensão máxima do agregado graúdo e do módulo de finura do agregado miúdo, é apresentada na tabela 4.10.

TABELA 4.10 – Estimativa do volume do agregado graúdo seco solto, por unidade de volume de concreto (ACI 211.2-98).

Dimensão máxima do agregado, em mm.	Volume de agregado graúdo seco solto (m^3) por unidade de volume de concreto para diferentes módulos de finura do agregado miúdo			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,58	0,56	0,54	0,52
12,5	0,67	0,65	0,63	0,61
19	0,74	0,72	0,70	0,68

Etapa 7: Ao final da etapa 6, todos os componentes do concreto foram estimados, exceto a quantidade do agregado miúdo. Nesta etapa final, a estimativa da quantidade do agregado miúdo é determinada pela diferença entre a massa específica aparente do concreto no estado fresco, estimado através de experiências ou com base na tabela 4.11, e a soma de todas as massas específicas aparentes dos componentes individualizados. Para o uso da tabela 4.11 faz-se necessário a determinação do fator da massa específica do agregado graúdo, além de uma estimativa do ar incorporado no concreto logo após sua mistura.

TABELA 4.11 – Estimativa da massa específica do concreto no estado fresco em função do teor de ar incorporado e do fator da massa específica do agregado graúdo (ACI 211.2-98).

Fator da massa específica	Teor de Ar Incorporado		
	4 (%)	6 (%)	8 (%)
1	1596	1560	1519
1,2	1679	1643	1608
1,4	1768	1727	1691
1,6	1851	1810	1774
1,8	1934	1899	1857
2	2023	1982	1940

Assim, após a determinação das quantidades de todos os componentes presentes no concreto estrutural leve, a determinação do traço unitário, em massa, é obtido dividindo-se as quantidades de cada material pelo consumo de cimento obtido.

De posse do primeiro traço (CEL 60-40), os dois outros traços complementares para esta etapa foram definidos variando-se apenas os percentuais das argilas expandidas, mantendo-se constante os demais materiais, inclusive a relação a/c.

Os percentuais iniciais das argilas expandidas foram de 60% para a argila AE-0500 e 40% para a argila AE-1506. A variação percentual para o segundo traço (CEL 70-30) foi de 70% para a argila AE-0500 e 30% para a argila AE-1506. O terceiro e último traço desta etapa teve variação percentual de 80% da argila AE-0500 e 20% da argila AE-1506. A adoção da nomenclatura dos traços tem a seguinte denotação:

- CEL 60-40 – Concreto Leve Estrutural com 60% AE-0500 e 40% AE-1506;

- CEL 70-30 – Concreto Leve Estrutural com 70% AE-0500 e 30% AE-1506;
- CEL 80-20 – Concreto Leve Estrutural com 80% AE-0500 e 20% AE-1506.

Na tabela 4.12 ilustram-se as quantidades dos materiais, em kg/m³, dos traços do concreto leve estrutural fabricados nesta etapa do estudo e a relação 1:m (relação cimento-massa dos agregados).

TABELA 4.12 – Quantidades dos materiais, em kg/m³, para concreto estrutural leve.

Traço	CIMENTO	AREIA	AE-0500	AE-1506	a/c	c/m
CEL 60-40	420,00	348,60	315,00	210,00	0,43	0,48
CEL 70-30	420,00	348,60	369,60	155,40	0,43	0,48
CEL 80-20	420,00	348,60	420,00	105,00	0,43	0,48

c/m – relação cimento/materiais secos

Após a definição de todos os traços desta etapa e suas adaptações, com base no método do ACI, foram calculadas e separadas as quantidades dos materiais necessários para moldagem de 15 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada traço elaborado. À quantidade de cada material calculado fez-se um acréscimo de 10% à sua massa para eventuais perdas durante a realização dos ensaios de trabalhabilidade (abatimento do tronco de cone) e moldagens dos corpos-de-prova. Tanto a areia como a argila expandida foi seca em estufa (105° C) para retirada de umidade porventura existente. Após secagem das argilas expandidas (AE-0500 e AE-1506), procedeu-se ao seu pré-umedecimento 24 horas antes do dia da concretagem das amostras cilíndricas.

A quantidade de água utilizada para o pré-umedecimento foi o equivalente, em massa, ao teor de absorção de água determinado para cada tipo de argila (15,3% para a argila AE-0500 e 13,5% para a argila AE-1506), conforme resultados apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9.

A ordem de colocação dos materiais e tempo de homogeneização da mistura encontra-se especificado na tabela 4.13.

TABELA 4.13 – Procedimento de mistura dos materiais para produção dos concretos CEL.

Ordem de colocação dos materiais na betoneira	Materiais e tempo de mistura
1º	Argilas expandidas pré-umedecidas + areia (1 min.)
2º	Cimento + 50% água de amassamento (3 min.)
3º	50% água de amassamento (5 min.)

Os materiais foram misturados em uma betoneira da marca Menegotti com capacidade de 120 litros do laboratório de Materiais de Construção do IFRN em temperatura ambiente de aproximadamente $27^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$.

Completado o processo de mistura, foi feito apenas uma determinação da consistência do concreto através do ensaio de abatimento do tronco de cone, em conformidade com as recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Antes da moldagem, todos os moldes cilíndricos metálicos e suas bases foram convenientemente identificados e revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral. A moldagem de cada corpo-de-prova foi realizada em duas camadas através de adensamento manual. Para cada camada foram aplicados 12 golpes com haste de adensamento distribuídos de modo uniforme por toda a superfície, conforme recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003). Após o adensamento da última camada, procedeu-se o rasamento da superfície com régua metálica.

Posteriormente, foram colocadas placas de vidro devidamente untadas na superfície em contato com o concreto com a finalidade de evitar perda de água. Decorrido o período de 24h após moldagem das amostras, procedeu-se a desfôrma dos corpos-de-prova e cura das amostras, que ficaram submersas em tanque com água até o dia da realização dos ensaios.

Para o ensaio de permeabilidade a gás nitrogênio, foram moldados três corpos-de-prova cilíndricos em fôrmas metálicas de 38 mm de diâmetro e 76 mm de altura. Para o adensamento destas amostras foram aplicados golpes na parede externa do molde, de maneira suave, até a completa acomodação do concreto. Os procedimentos de desfôrma e cura foram os mesmos adotados para os corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

4.2.2 Dosagem e produção dos concretos estruturais leves autoadensáveis (CELA)

A metodologia de dosagem para concretos estruturais leves autoadensáveis foi baseada, unicamente, na alteração das quantidades dos materiais obtidos no método já mencionado no subitem anterior. Com a inclusão de novas adições minerais em substituição ao cimento, optou-se por aumentar o consumo de cimento inicialmente calculado no traço de melhor desempenho (CEL 80-20), uma vez que se precisava garantir a resistência estrutural dos concretos (acima de 20 MPa), além da trabalhabilidade e coesão entre os materiais.

No entanto, percebeu-se que o concreto apresentava pouca trabalhabilidade frente aos requisitos exigidos pela norma NBR 15823 (2010). Assim, através do método de tentativas e erros, após a inclusão de pequenas porcentagens de aditivo superplasticante (0,2% em relação à massa de materiais cimentícios), realizava-se ensaios de trabalhabilidade até o concreto atingir, no ensaio de espalhamento, diâmetros superiores a 500 mm. Ao final deste processo, quando alcançado índice de trabalhabilidade desejado, dava-se prosseguimento aos demais ensaios do concreto no estado fresco.

Assim como nos procedimentos adotados para o concreto estrutural leve, após a definição dos cinco traços desta etapa, os materiais constituintes foram calculados e separados nas quantidades necessárias para moldagem de 15 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada traço elaborado.

À quantidade de cada material calculado, fez-se um acréscimo de 20% à sua massa para eventuais perdas durante a realização dos ensaios específicos a este tipo de concreto (*slump flow test*, funil V, caixa L e teor de ar incorporado) e moldagens dos corpos-de-prova. Tanto a areia como a argila expandida foi seca em estufa (105° C) para retirada de umidade porventura existente. Após secagem das argilas expandidas (AE-0500 e AE-1506), procedeu-se ao seu pré-umedecimento 24 horas antes do dia da concretagem das amostras cilíndricas.

Os consumos de materiais, em kg/m³, dos concretos estruturais leves autoadensáveis estão indicados na tabela 4.14.

TABELA 4.14 – Consumo de materiais, em kg/m³, para mistura dos CELA.

Materiais	CELA 00M-00C	CELA 05M-05C	CELA 10M-00C	CELA 00M-10C	CELA 00M-20C
Cimento	555,50	499,95	499,95	499,95	444,45
Metacaulim	0	27,78	55,55	0	0
Cinza	0	27,78	0	55,55	111,10
Areia	493,78	493,78	493,78	493,78	493,78
AE-0500	436,43	436,43	436,43	436,43	436,43
AE-1506	124,85	124,85	124,85	124,85	124,85
Água	230	230	230	230	230
Aditivos em função dos materiais finos	0,6% GL + 0,6% MX	0,6% GL + 0,6% MX	0,6% GL + 0,6% MX	0,6% GL + 0,4% MX	0,6% GL + 0,4% MX

GL – Glenium
MX – Mastermix

Para manter o diâmetro de espalhamento (*slump flow test*) desejável (> 500 mm) com a mesma relação a/mf (água/materiais finos), o uso de aditivo superplastificante e plastificante tiveram pequenas variações, principalmente nas misturas em que houve substituição de parte do cimento apenas por cinza de biomassa (CELA 00M-10C e CELA 00M-20C).

Na tabela 4.15 resumem-se os teores de cimento e adições substituídas, relações água/materiais finos e água/materiais cimentícios.

TABELA 4.15 – Teores de cimento e adições minerais em substituição ao cimento para concretos CELA.

Nomenclatura	Cimento (%)	Metacaulim (%)	Cinza de Biomassa (%)	a/c	a/mc
CELA 00M-00C	100	0	0	0,41	0,41
CELA 05M-05C	90	5	5	0,46	0,41
CELA 10M-00C	90	10	0	0,46	0,41
CELA 00M-10C	90	0	10	0,46	0,41
CELA 00M-20C	80	0	20	0,52	0,41

a/c – relação água/cimento

a/mc – relação água/materiais cimentícios

Os concretos produzidos obedeceram à seguinte seqüência de produção:

- a) Lançamento dos agregados leves pré-umedecidos na proporção de 80% da AE-0500 e 20% da AE-1506, com as devidas porcentagens de absorção observadas na etapa 1, na betoneira parada. Em seguida foi adicionada a areia. Os componentes eram misturados por 1 minuto para homogeneização;
- b) Em continuidade, foi adicionado o cimento com as respectivas adições minerais especificada para cada traço e novamente homogeneizados por 3 minutos;
- c) Adição da metade da água à mistura seguida de 1 minuto de homogeneização;
- d) Adição dos aditivos ao restante da água e lançamento gradual no misturador. Após toda a adição dos componentes na betoneira, a mistura foi processada por cerca de 3 minutos até completa homogeneização.

A moldagem foi realizada através da colocação dos concretos nos moldes metálicos sem a utilização de equipamentos mecânicos ou artifícios que ocasionasse o seu adensamento.

Os moldes metálicos foram previamente identificadas e pesadas para determinação da massa específica aparente do concreto no estado fresco.

Após moldagem e pesagem de cada molde metálico preenchido com concreto, foram colocadas placas de vidro na superfície e mantidos desta maneira por 24 horas em temperatura ambiente de laboratório ($27^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$). Desformados, estes foram identificados e pesados ao ar e submersos para determinação da massa específica do concreto com 1 dia de idade na condição superfície saturada seca. Em seguida, procedeu-se a determinação do tempo de onda ultra-sônica através de equipamento da marca CONTROLS, modelo E8-E0048.

Vale ressaltar que antes das moldagens dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de espalhamento, funil “V”, caixa “L” e teor de ar incorporado. Apenas a amostra utilizada no ensaio de teor de ar incorporado foi descartada.

Mediu-se também o teor de ar aprisionado em equipamento da marca Solotest, utilizando-se do método pressométrico, que se baseia nos princípios da Lei de Boyle, de acordo com os procedimentos prescritos na norma NBR NM 47 (2002). Para este último ensaio foram feitas duas determinações.

4.3 Métodos de ensaios nos concretos

4.3.1 Ensaios no estado fresco

4.3.1.1 *Reologia*

Para os concretos estruturais leves (CEL) foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, segundo a norma NBR NM 67 (1998).

Para os concretos estruturais leves autoadensáveis (CELA), o ensaio do tronco de cone foi utilizado para medir o espalhamento (*slump flow test*), sendo anotado o tempo em que o concreto se espalha até o diâmetro de 500 mm (t_{500}), e o diâmetro final do concreto espalhado, através de duas medidas perpendiculares entre si.

Ainda para o CELA, foi executado o ensaio da caixa “L”, no qual se verificou a capacidade deste concreto de passar por obstáculos, simulando uma situação de concretagem de peças com alta taxa de armadura e o ensaio do funil “V”, que mede a capacidade do material escoar em ambientes confinados.

4.3.1.2 *Massa específica*

A massa específica pode ser definida como sendo a relação entre a massa do sólido e o volume que ele ocupa, incluindo os poros impermeáveis. Esta característica está diretamente relacionada à massa específica de cada um dos seus componentes e suas proporções na mistura.

Para determinação da massa específica aparente do concreto fluido, os moldes metálicos untados com óleo mineral foram pesados antes e após colocação do concreto em balança com capacidade para 5 kg e precisão de 0,1g. Esta diferença de peso fornece a massa do concreto fresco e, dividindo-se pelo volume do molde, tem-se a determinação da massa específica aparente do concreto no estado fluido.

Embora esta característica não seja qualitativa, pode ter uma grande importância, quando os valores extrapolam a faixa usual esperada, principalmente no que se refere ao transporte e lançamento do concreto e ao dimensionamento de fôrmas e cimbramentos da estrutura.

Outras características também podem influenciar na massa específica, como a granulometria, forma e textura dos grãos dos agregados. Estas podem proporcionar uma maior ocupação de sólidos no concreto no estado fresco, aumentando, desta forma, a sua massa específica (MOURA, 2000). Portanto, a determinação desta característica tem maior importância quando um dos materiais apresenta massa específica bastante inferior aos convencionais, como é o caso da argila expandida.

A determinação desta propriedade pode também orientar no sentido de indicar a uniformidade da distribuição dos agregados na massa cimentícia das amostras e dos concretos.

4.3.2 Ensaios no estado endurecido

4.3.2.1 *Absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massas específicas seca, saturada e real*

Para realização destes ensaios foram utilizadas três amostras de concreto cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada mistura. Os ensaios foram realizados após período de cura de 28 dias, e em conformidade com a NBR 9778 (2005).

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Construção Civil do IFRN, seguindo o procedimento indicado na NBR 9778 (ABNT, 2005) de acordo com as etapas abaixo:

- a) Imersão das amostras em água a 20° C até que as determinações sucessivas de massas realizadas a intervalos de 24 horas, mostrassem

um aumento de massa inferior a 0,5%. As massas das amostras (m_i) eram medidas em uma balança hidrostática;

- b) As amostras eram removidas da água e com um pano úmido, as suas superfícies eram secadas para remover a umidade superficial. As massas saturadas das amostras eram então determinadas (m_{sat});
- c) Em seguida, secava-se a amostra em uma estufa a 105° C até que a determinação sucessiva das massas em intervalo de 24 horas mostrasse uma redução de massa inferior a 0,5%. Após a remoção da estufa, as amostras eram resfriadas a temperatura ambiente para posterior determinação da massa seca em estufa (m_s).

Após obter as massas mencionadas acima, foi possível calcular o índice de vazios (I_v), a porosidade total (P_{TOTAL}), a absorção por imersão ($Ab_{\text{IMERSÃO}}$), a massa específica da amostra seca (ME_{SECA}), a massa específica da amostra saturada (ME_{SAT}) e a massa específica real (ME_{REAL}). As mesmas amostras utilizadas nesses ensaios serviram também para determinação da absorção por capilaridade.

Os valores das características físicas foram determinados através das seguintes expressões:

$$Ab_{\text{IMERSÃO}} = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4.2)$$

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (4.3)$$

$$ME_{\text{SECA}} = \frac{m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (4.4)$$

$$ME_{\text{SAT}} = \frac{m_{\text{sat}}}{m_{\text{sat}} - m_i} \quad (4.5)$$

$$ME_{\text{REAL}} = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (4.6)$$

$$P_{TOTAL} = \frac{m_{sat} - m_s}{V_T} \times 100 \quad (4.7)$$

onde: m_s é a massa seca da amostra; m_i é a massa imersa da amostra e m_{sat} é a massa saturada da amostra e V_T é o volume total da amostra (1570 cm³).

4.3.2.2 Absorção por capilaridade

Os ensaios foram realizados no Laboratório Construção Civil (IFRN), com base nos procedimentos indicados na NBR 9779 (ABNT, 1995). As seguintes etapas foram utilizadas:

- ✓ Pesagem das amostras e secagem em estufa a uma temperatura de 105° C até que a determinação sucessiva de massas em intervalo de 24h mostrasse uma redução de massa inferior a 0,5%. Após a remoção da estufa, as amostras foram resfriadas a temperatura ambiente para posterior determinação da massa seca em estufa (m_s);
- ✓ Instalação do recipiente em sala climatizada (temperatura constante de 23° C);
- ✓ Posicionamento das amostras sobre suportes, preenchendo com água o recipiente do ensaio, de modo que o nível de água permanecesse constante a 5 ± 1 mm acima de sua face inferior, evitando a molhagem de outras superfícies;
- ✓ Determinação da massa das amostras com 3h, 6h, 24h, e as demais horas em intervalos de 24h até o período final de 72h. As amostras eram removidas da água e com um pano úmido, as superfícies eram secadas para remover a umidade superficial. As massas das amostras eram então, determinadas ($m_{contato}$) e retornadas imediatamente ao recipiente;
- ✓ Rompimento das amostras por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 1994), de modo a permitir a anotação da distribuição de água no seu interior.

O cálculo da absorção de água por capilaridade (Ab_{CAP}), em g/cm², foi realizado de acordo com a seguinte expressão:

$$Ab_{CAP} = \frac{m_{contato} - m_s}{A} \times 100 \quad (4.8)$$

onde:

$m_{contato}$ é a massa da amostra que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa, assim que atingiu a temperatura ambiente (g) e,

A é a área da seção transversal (cm²), equivalente ao produto da altura que a água atingiu internamente no corpo-de-prova vezes o seu diâmetro.

4.3.2.3 Resistência à compressão axial (f_c)

Os ensaios de resistência à compressão axial foram executados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 1994), para as idades de 1, 7, 28 e 91 dias, sendo ensaiados no mínimo 03 corpos-de-prova para cada idade. Após a retirada dos corpos-de-prova do tanque de água, estes foram capeados com uso de enxofre para regularização do topo por ser a superfície de maior irregularidade. Para a realização do ensaio utilizou-se prensa hidráulica do Laboratório de Construção Civil – LCC do IFRN, marca Solotest, munida de dois manômetros com capacidades de 120 tf e 240 tf, precisão de 200 kgf.

4.3.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

O princípio fundamental do método para determinação do módulo de elasticidade dinâmico se baseia na teoria de propagação da velocidade de ondas longitudinais, obtidas por pulso ultra-sônico. Apesar da Norma Brasileira (NBR

15630, 2008), que se utiliza deste método, ser específica para argamassas, os resultados apresentados servem como comparativos de identificação da deformabilidade dos concretos em relação às proporções e materiais utilizados.

Os ensaios de determinação da velocidade ultrassônica foram realizados nas idades de 1 dia, 7 dias, 28 dias e 91 dias, em amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Na tabela 4.16, informa-se a idade das amostras quando na realização do ensaio e as respectivas quantidades de amostras para cada dosagem. A redução progressiva na quantidade de amostras em relação ao tempo utilizadas neste ensaio deve-se ao fato de que, para cada idade, três amostras eram utilizadas no ensaio de resistência à compressão e, desta forma, reduzia-se a quantidade de amostras para ensaio na idade seguinte.

TABELA 4.16 – Idade e quantidade de amostras ensaiadas.

Tempo (dias)	Quantidade de amostras
1	15
7	12
28	9
91	3

4.3.3 Propriedades de durabilidade

4.3.3.1 *Permeabilidade a gás nitrogênio*

A análise do coeficiente de permeabilidade dos concretos consistiu em submeter amostras de concreto cilíndricas sob fluxo de gás nitrogênio unidirecional acondicionadas em célula de pressão constante. As amostras utilizadas para determinação do coeficiente de permeabilidade utilizadas neste estudo tinham, em média, 38 mm de diâmetro e 76 mm de comprimento.

Após 24 h da moldagem, os corpos-de-prova foram desmoldados e mantidos em tanques de água submersos até completaram 28 dias de idade juntamente com

os corpos-de-prova (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) utilizados para determinação propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

No 28º dia, os corpos-de-prova foram colocados em estufa na temperatura de 105º C por 72 horas. Decorrido este período, as amostras eram resfriadas à temperatura ambiente e envoltas em papel filme no sentido de evitar a absorção de umidade do ar (figura 4.6).

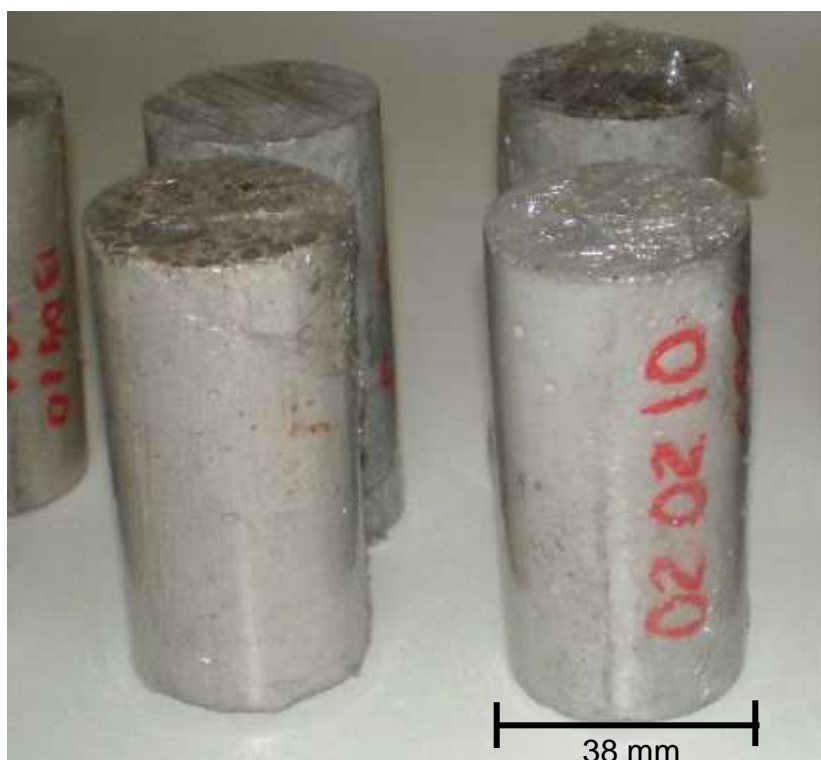


FIGURA 4.6 – Amostras cilíndricas para ensaio de permeabilidade a gás nitrogênio.

A determinação do coeficiente de permeabilidade a gás nitrogênio (k) se deu em equipamento específico da marca Core Laboratories Instruments ULTRA-PERM 500, que mede a permeabilidade a gás nitrogênio, de forma direta em programa computacional (*WimPerm*) acoplado ao equipamento, numa faixa de 0,001 mD a 30.000 mD.

Duas amostras cilíndricas foram utilizadas na determinação do coeficiente de permeabilidade para cada dosagem estudada.

Para análise comparativa dos resultados, obtidos diretamente do programa computacional *WinPerm*, com os valores específicos de permeabilidade a gás em

concretos existentes na literatura técnica (tabela 3.2), transformou-se os valores obtidos em mD para m² através da seguinte relação: 1 mD = 9,869233 x 10⁻¹⁶ m².

4.3.4 Características microestruturais

4.3.4.1 Fluorescência (FRX)

A composição química dos materiais de partida e dos concretos foi determinada por fluorescência de raios X por energia dispersiva (FRX). Para isso, utilizou-se o equipamento Espectrômetro por fluorescência de raios X, da marca Shimadzu modelo EDX-720, alocado nas instalações do Laboratório de Processamento Mineral e de Resíduos (LPMR) do IFRN. Os resultados obtidos são apresentados na forma dos óxidos estáveis dos elementos químicos presentes. Por limitação do método, somente elementos entre Na (12) e U (92), na tabela periódica, são detectados.

A coleta de amostra para realização da fluorescência consistiu de pequenos fragmentos retirados de corpos-de-prova que apresentaram maior resistência à compressão, após a ruptura aos 28 dias, realizando-se a moagem destes fragmentos em almofariz e posterior peneiramento, utilizando-se unicamente da peneira de abertura de 75 µm (#200 *mesh*). O material passante foi submetido à secagem em estufa a temperatura de 105° C por 72 horas. Neste procedimento, procurou-se coletar apenas pedaços da argamassa, de modo a evitar a interferência dos compostos da argila na interpretação dos resultados. Contudo, alguns fragmentos da argila foram aderidos à argamassa.

A realização da análise utiliza-se do método semi-quantitativo, numa atmosfera de vácuo.

4.3.4.2 Difração de raios X (DRX)

A análise mineralógica das matérias-primas e concretos, ensaios de DRX foram realizados em difratômetro de raios X da marca Shimadzu XRD-7000 com tubo de Cu ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$). A tensão utilizada foi de 30 kV e a corrente de 30mA, com varredura de 2° a 80° para 2θ , com velocidade de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ/\text{passo}$. A avaliação das fases de cada material foi dada por comparação entre os picos regados no difratograma com cartas padrões do programa de computador JCPDF, cadastradas no ICDD (*Internacional Centre for Diffraction Data*). Os resultados dos ensaios realizados são apresentados na forma percentual dos principais óxidos: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 , MgO e BaO .

A difração de raios X (DRX) é um tipo de ensaio que permite a identificação de fases hidratadas e amorfas dos materiais constituintes do composto cimentício e também informações sobre a estrutura cristalográfica, além de auxiliar na interpretação do desempenho do concreto, principalmente com relação à resistência e a durabilidade.

Este método de análise baseia-se na incidência de feixes de raios X monocromáticos sobre a amostra do material. Este processo é feito dentro de um aparelho apropriado no qual a amostra fica em uma posição fixa e o ângulo de incidência é variado pelo aparelho, de acordo com a programação prévia dos ângulos inicial e final.

A difração acontece em várias direções devido à existência de diferentes planos cristalinos das fases cristalinas da amostra, entretanto existem interações entre as ondas da radiação X somente nas direções em que os efeitos das células vizinhas provocam entre si uma interferência construtiva completa, que são representadas por pico no diagrama de difração.

A determinação mineralógica das amostras dos materiais constituintes (cinza de biomassa, metacaulim e argila expandida) e dos concretos leves autoadensáveis foi realizada pela análise de difração de raios X, através do método do pó, realizada em um difratômetro da marca Shimadzu, modelo DX-720, com fonte de Cu 40 Kv e

30 mA, filtro de níquel, em sistema com obtenção de dados computadorizado, existente no laboratório de processamento de minérios e resíduos do IFRN.

A coleta de amostras para a realização do ensaio de DRX dos concretos leves autoadensáveis obedeceu aos mesmos procedimentos adotados quando na retirada de fragmentos dos concretos para a análise de fluorescência, inclusive o processo de moagem, peneiramento e secagem.

4.3.4.3 *Micrografia eletrônica por varredura (MEV)*

Na microscopia eletrônica de varredura, quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, são originados diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados, dentre outros. Essas respostas podem ser detectadas independentemente e, depois de transformadas em sinais elétricos, permite a aquisição de imagens de superfície, composição de fases e análise composicional. Elétrons secundários são partículas de baixa energia resultantes de uma colisão inelástica de elétrons primários do feixe emitido com elétrons da amostra. Seu registro possibilita a caracterização da topografia da amostra, com identificação do tamanho e textura superficial (SARKAR *et al.*, 2001).

Os elétrons retroespalhados, por sua vez, são partículas de alta energia espalhados pela amostra. Neste caso, a imagem é formada pelo contraste devido aos números atômicos das diferentes fases que compõem a amostra.

As análises foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura modelo SSX-550 da marca Shimadzu, com detecção de imagens a partir de elétrons secundários e de elétrons retroespalhados, alocado no Laboratório de Ensaios de Materiais do CTGás. O feixe principal foi gerado a partir de filamento de tungstênio operando a 20 kV e com distância de trabalho em torno de 40 mm. Para realização deste ensaio, as amostras foram posicionadas em porta amostras de latão e, em seguida, metalizadas com fina camada de ouro através do metalizador Jeol JEF-4X, a fim de também torná-las condutoras.

As amostras submetidas ao MEV foram provenientes de pequenos fragmentos dos corpos-de-prova dos concretos que apresentaram maiores resistências à compressão aos 28 dias.

Após a coleta, estes pequenos fragmentos foram secos em estufa na temperatura de 105° C por período de 72 horas. Posterior à secagem, acondicionou-se as amostras em cápsulas plásticas para evitar absorção da umidade do ar até a realização do MEV (figura 4.7).



FIGURA 4.7 – Fragmentos de concreto para ensaio de MEV.

Utilizou-se, também, nesta etapa do trabalho, a espectrografia por dispersão de energias (EDS), que permite realizar análise química elementar em um ponto ou em um volume de alguns micrômetros cúbicos associado a um sistema de análise de raios X. Como as dimensões das partículas dos produtos das reações de hidratação do cimento variam entre alguns nanômetros e um micrômetro, o resultado das análises pontuais torna-se pouco preciso.

Entretanto, pode-se obter uma estimativa da composição dos principais produtos da hidratação do cimento, como CH, C-S-H, AFt e Afm, em uma análise pontual pelas relações entre as massas atômicas de alguns óxidos presentes nesta análise, como SiO₂, CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃ e SO₃ (ROSSIGNOLO, 2003).

A identificação e determinação da composição de um elemento são feitas pela comparação da intensidade das riscas espectrais características da amostra com espectros de referência contidos em bancos de dados. Esta análise é realizada em termos qualitativos, semiquantitativos e quantitativos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização dos materiais de partida

A partir da seleção e aquisição dos materiais em quantidades suficientes e necessárias para a realização de todo o estudo, os mesmos foram então caracterizados. Para tanto foram realizados ensaios de caracterização físico-química para o cimento, argilas expandidas, metacaulim e cinza de biomassa da cana-de-açúcar, análise granulométrica da cinza de biomassa e dos agregados, bem como suas massas específicas e massas unitárias.

5.1.1 Cimento

Na tabela 5.1 apresentam-se as propriedades físicas do cimento CP-II Z 32 RS, determinadas no Laboratório de Construção Civil, necessárias para cálculos de dosagem.

TABELA 5.1 – Propriedades físicas do cimento Portland CP-II Z 32 RS.

Propriedades físicas	Valores	Unidades	Norma
Massa Específica	3,09	g/cm ³	NBR NM 23 (2001)
Massa Unitária	1,10	g/cm ³	NBR NM 45 (2006)

Para determinação da composição química do cimento Portland foi empregada análise semi-quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X. Os resultados dos ensaios de fluorescência de raios X são apresentados na tabela 5.2 na forma percentual de óxidos.

TABELA 5.2 – Composição química do cimento CP-II Z 32 RS.

Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Outros
(%)	60,82	18,88	7,07	5,38	3,43	2,01	1,87	0,29	0,11

Cálculos potenciais (equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4), realizados pelo método proposto por R. H. Bogue (TAYLOR,1990), para a obtenção de valores previsionais da composição potencial dos compostos do cimento, estão evidenciados na tabela 5.3.

TABELA 5.3 – Composição potencial de Bogue do cimento CP-II Z 32 RS.

Composição Potencial	Teor (% em massa)
C ₃ S	36,377
C ₂ S	26,746
C ₃ A	12,933
C ₄ AF	10,425

5.1.2 Cinza de biomassa de cana-de-açúcar

Na tabela 5.4 destacam-se as propriedades físicas da cinza. Os ensaios de resíduo, massa unitária e massa específica foram realizados no Laboratório de construção Civil (IFRN). O ensaio de determinação da área específica foi realizado no Laboratório de Cimentos (UFRN) através do método BET.

TABELA 5.4 – Propriedades físicas da cinza de biomassa de cana-de-açúcar.

Propriedades Físicas da Cinza		
Resíduo na peneira 75 µm (%)	2,00	NBR 12653 (1992)
Massa Específica (g/cm ³)	2,42	NBR NM 23 (2001)
Massa Unitária (g/cm ³)	0,66	NBR NM 45 (2006)
Área Específica (m ² /g)	43,04	Método BET

A figura 5.1 apresenta a curva granulométrica da cinza. Verifica-se que a cinza apresentou granulometria, depois de moída, entre 0,32 µm e 38 µm. Esta apresentou um valor de 37% em volume, abaixo de 2 µm, 59% entre 2 µm e 20 µm e

somente 4% acima de 20 μm . A cinza apresentou um diâmetro médio de partículas de 5,70 μm .

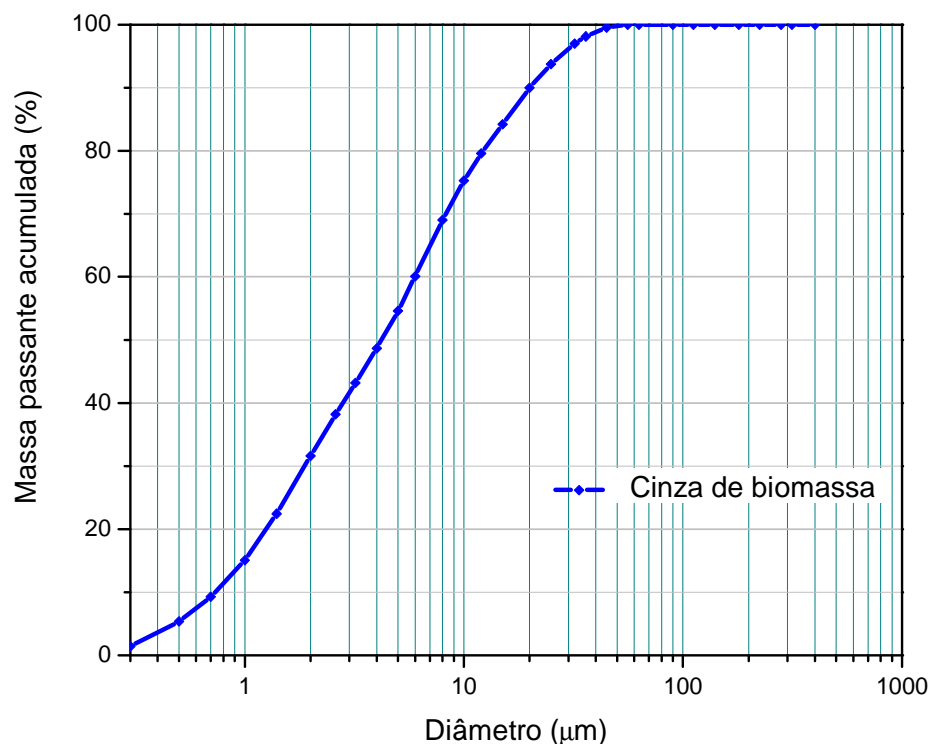


FIGURA 5.1 – Curva granulométrica da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com 3h de moagem.

A identificação dos principais compostos químicos determinada no ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X está apresentada na tabela 5.5.

TABELA 5.5 – Principais compostos químicos da cinza de biomassa.

Composição Química	(%)
SiO_2	72,69
Fe_2O_3	9,61
Al_2O_3	6,91
K_2O	4,71
CaO	2,84

A presença do quartzo pode ser atribuída a dois fatores. O primeiro, conforme explica Cordeiro (2006), deve-se, provavelmente, do silício que é adsorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) e, o segundo fator, atribui-se à presença de pequenos grãos de areia aderidos as raízes da cana-de-açúcar que não foram totalmente removidos no processo de lavagem.

Segundo Martirena Hernández *et al.* (1998), a alta temperatura de combustão do bagaço de cana-de-açúcar, quando superior a $800^\circ C$, ocasiona a formação de fases cristalinas da sílica, tornando o material menos reativo. Para uma maior reatividade deste material, faz-se necessário que o mesmo apresente substâncias na forma amorfa.

Com relação à finura, Cordeiro (2006) argumenta que o aumento na área específica da cinza, obtida através do processo de moagem, resulta em um aumento na velocidade da resistência mecânica nos compósitos cimentícios.

Os resultados do ensaio de difração de raios X, ilustrado na figura 5.2, apresentaram picos de SiO_2 (quartzo), evidenciando que as amostras da cinza possuem materiais cristalinos. Porém, como o pico observado no ângulo $2\theta = 27,1^\circ$ ($3,29 \text{ \AA}$) foi muito intenso, acaba por mascarar a identificação de outras fases nos halos amorfos do difratograma. Assim, uma nova análise foi realizada eliminando a fase presente neste pico, conforme ilustração na figura 5.3.

As informações foram obtidas através do comparativo entre fichas cristalográficas de referência de materiais puros JCPDS-JCCD (*International Centre for Diffraction Data*).

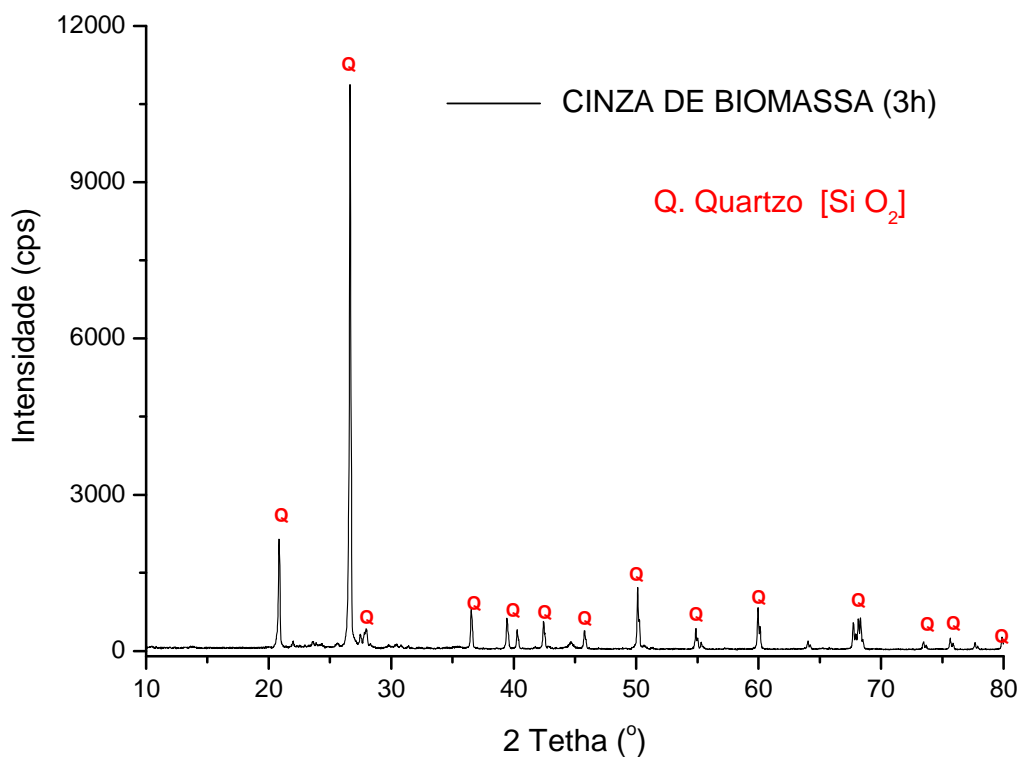


FIGURA 5.2 – Difratoograma de raios X da cinza de biomassa de cana-de-açúcar.

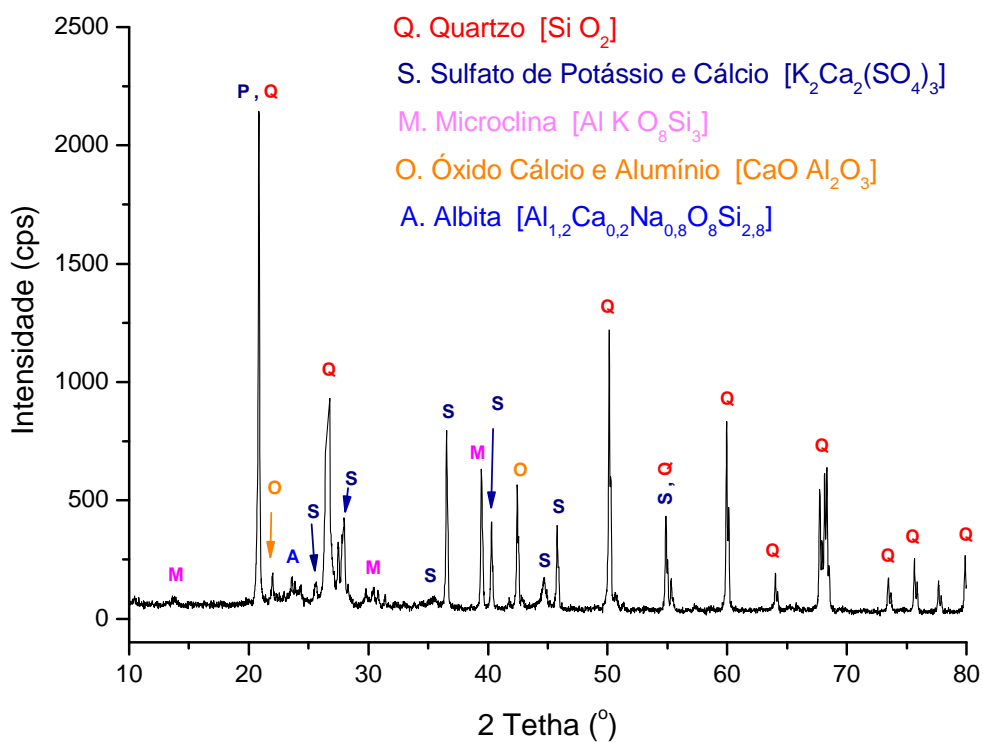


FIGURA 5.3 – Difratoograma de raios X da cinza de biomassa após eliminação do pico de maior intensidade de quartzo.

Para esta nova análise (figura 5.3), foram identificados, além do quartzo (SiO_2), substâncias de sulfato de potássio e cálcio, microclina na forma regular, óxido de cálcio e alumínio e albita, coerentes com a composição química da cinza apresentada na tabela 5.5.

A caracterização morfológica da cinza de biomassa é apresentada na figura 5.4. A composição química por microsonda EDS (espectroscopia por dispersão de energia utilizada para microanálise quantitativa) foi realizada em três pontos distintos (A, B e C), conforme identificação na figura.

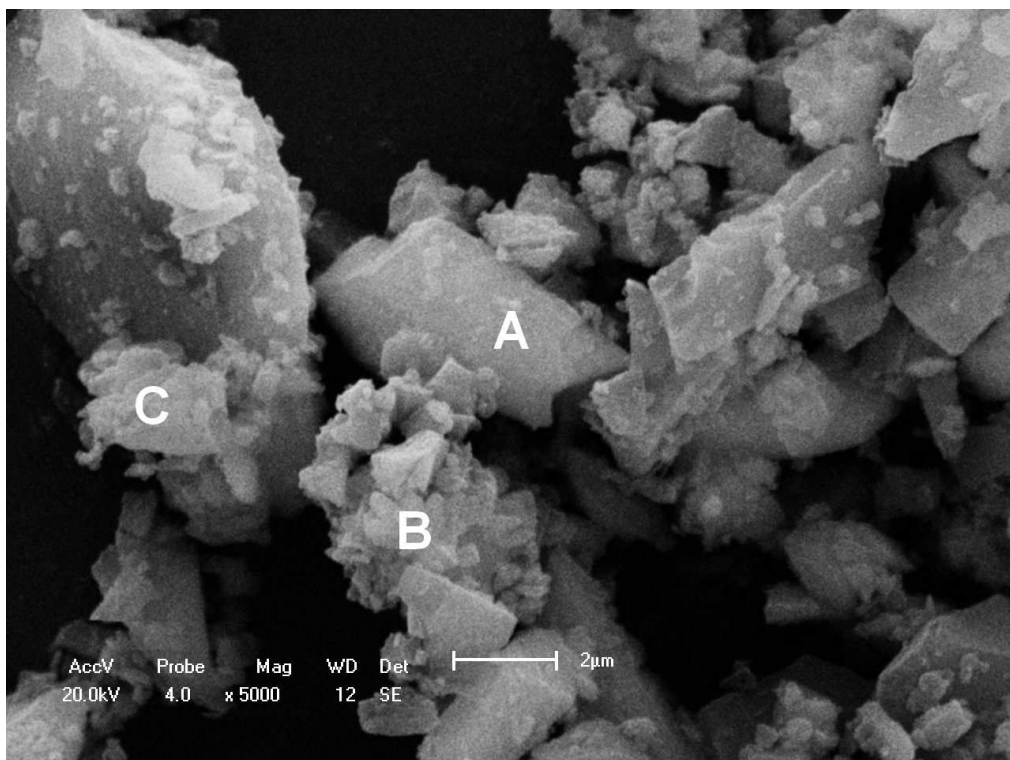


FIGURA 5.4 – Micrografia eletrônica por varredura da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com 3h de moagem com identificação dos pontos de análise por EDS (pontos A, B e C).

Com base na análise pontual por EDS, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresentou grande quantidade de Si no ponto A, como também alto teor de carbono (ponto C). No ponto B, foram identificados elementos de Si, Al, Ca, K e Na. Desse modo, com base no DRX apresentados nas figuras 5.2 e 5.3 e as análises pontuais por EDS, pode-se constatar que, mesmo a fase de quartzo sendo predominante na cinza de biomassa, existem substâncias amorfas presentes na sua constituição. O

carbono certamente é proveniente do processo de combustão incompleta, contribuindo para sua coloração escura.

5.1.3 Metacaulim

Na tabela 5.6 apresentam-se as propriedades físicas do metacaulim.

TABELA 5.6 – Propriedades físicas do metacaulim.

Propriedades Físicas		
Resíduo na peneira #200 (%)	2,13	NBR 12653 (1992)
Perda ao fogo (%)	0,90	NBR 12653 (1992)
Massa Específica (g/cm ³)	2,56	NBR NM 23 (2001)
Massa Unitária (g/cm ³)	0,56	NBR NM 45 (2006)
Área Específica (m ² /g)	18,8	Método BET

Os principais compostos químicos em forma de óxidos foram obtidos por ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X, conforme dados apresentados na tabela 5.7.

TABELA 5.7 – Composição química do metacaulim.

Análise Química	
Óxidos	(%)
SiO ₂	52,94
Al ₂ O ₃	32,83
Fe ₂ O ₃	6,92
TiO ₂	3,57
K ₂ O	1,64
SO ₃	0,88

O somatório dos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ correspondeu a 92,69%, superando o limite mínimo de 70% especificado pela norma NBR 12653 (1992) para pozolanas do tipo do metacaulim. O resultado da perda ao fogo de 0,9 % foi inferior ao valor máximo exigido pela referida norma, que é de 10%, para pozolanas.

A caracterização morfológica do metacaulim é apresentada na figura 5.5. Na composição química pontual (ponto A), realizada por microsonda EDS (espectroscopia por dispersão de energia utilizada para micro-análise quantitativa), confirma-se a predominância do SiO_2 e Al_2O_3 , que juntos representam mais de 85% da massa da amostra.

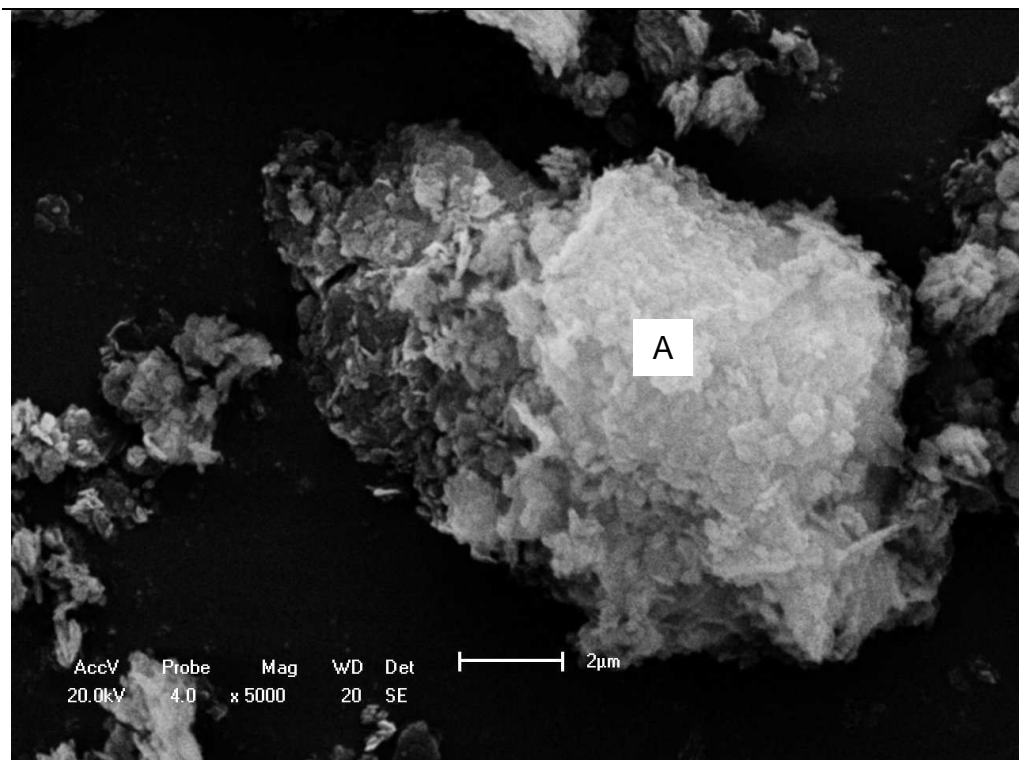


FIGURA 5.5 – Micrografia eletrônica por varredura do metacaulim com identificação do ponto de análise pontual por EDS.

A figura 5.6 mostra o difratograma de raios X do metacaulim. Analisando-se esta figura, percebe-se que se trata de um difratograma típico de um material amorfo, com representação de poucas fases cristalinas (sílica, caulinita, muscovita e illita).

Souza (2003) considera que o metacaulim é considerado de alta reatividade se apresentar teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superior a 90%, com perda máxima ao

fogo de 3%. Com base nos resultados apresentados e tomando-se como referência este autor, o metacaulim utilizado pode ser classificado como de alta reatividade.

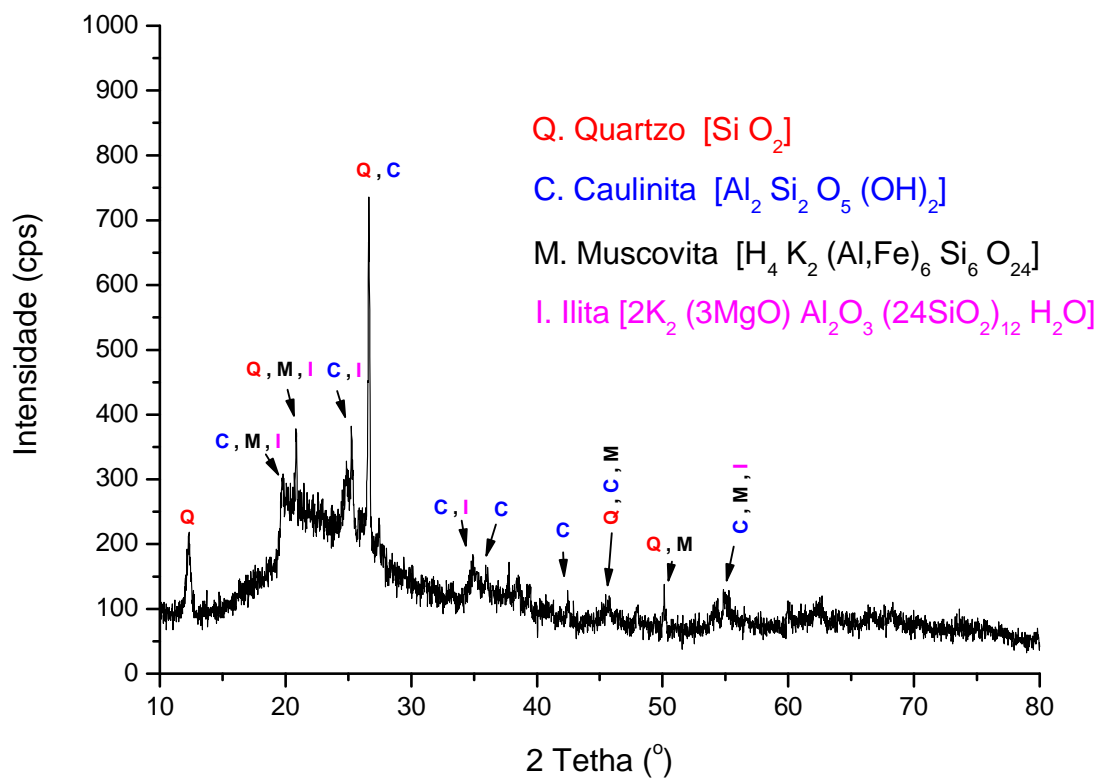


FIGURA 5.6 – Difratoograma de raios X do metacaulim.

5.1.4 Argila expandida

Nas tabelas 5.8 e 5.9, apresentam-se as propriedades físicas das argilas AE-0500 e AE-1506, respectivamente.

TABELA 5.8 – Propriedades físicas do agregado leve AE-0500.

Propriedades	AE-0500				
Massa Unitária	815 (kg/m³)				
Massa Específica	1320 (kg/m³)				
Absorção de água por imersão (%)	Tempo				
	15 min.	30 min.	45 min.	60 min.	24h
	6,95	9,45	10,99	11,05	15,30

TABELA 5.9 – Propriedades físicas do agregado leve AE-1506.

Propriedades	AE-1506				
Massa Unitária	544 (kg/m ³)				
Massa Específica	970 (kg/m ³)				
Absorção de água por imersão (%)	Tempo				
	15 min.	30 min.	45 min.	60 min.	24h
	5,72	8,00	9,24	9,46	13,50

A composição granulométrica das argilas expandidas AE-0500 e AE-1506 foram determinadas de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR NM 248 (2003). A granulometria pode ser considerada como a propriedade de um agregado de maior aplicação na prática, principalmente para a determinação do módulo de finura (MF), da dimensão máxima característica e da curva granulométrica utilizadas na dosagem do concreto. Na tabela 5.10 apresentam-se as composições granulométricas da argila AE-0500 e AE-1506.

TABELA 5.10 – Composição granulométrica dos agregados leves AE-0500 e AE-1506.

Abertura da peneira	AE-0500	AE-1506
	% Ret. Acumulada	% Ret. Acumulada
19 mm	0	0
12,5 mm	0	13
9,5 mm	0	66
6,3 mm	0	95
4,75 mm	3	99
2,36 mm	37	99
1,18 mm	65	100
600 µm	83	100
300 µm	94	100
150 µm	100	100
Resíduo	100	100
D _{máx}	4,8	19
MF	3,83	4,76

Na figura 5.7, ilustram-se as curvas granulométricas dos agregados leves AE-0500 e AE-1506.

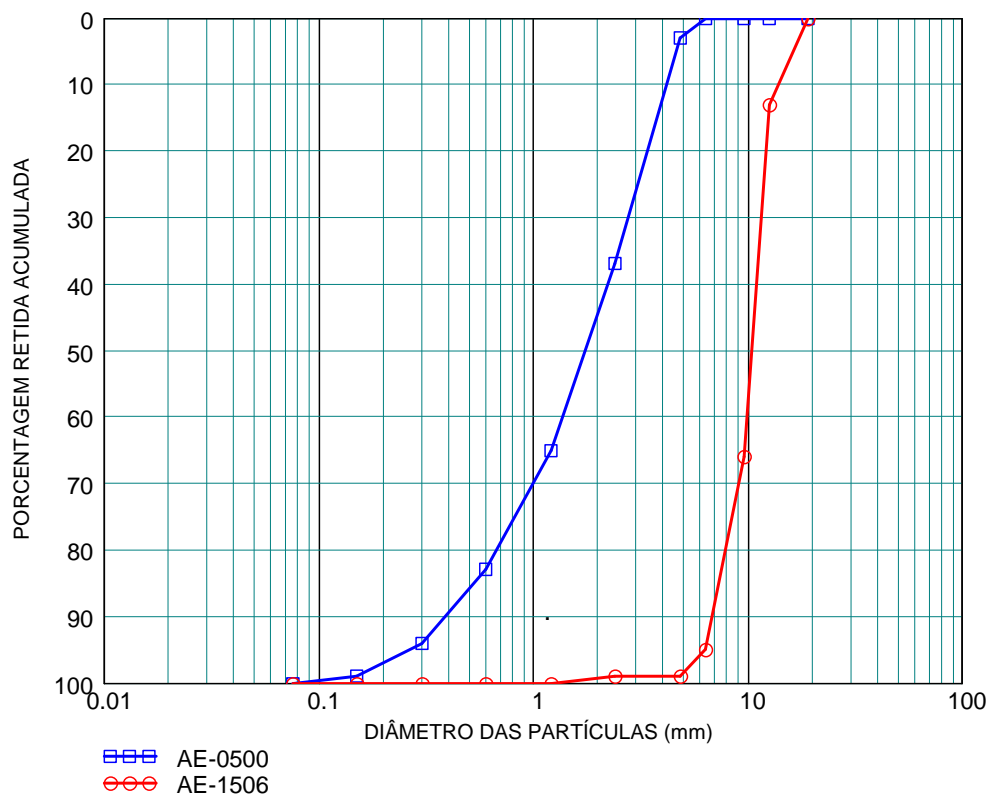


FIGURA 5.7 – Curvas granulométricas dos agregados leves AE-0500 e AE-1506.

Analisando-se isoladamente a composição granulométrica das argilas, percebe-se que as mesmas não se enquadram em nenhuma das faixas exigidas pela NBR 7211 (2005). No entanto, como as argilas foram utilizadas em conjunto em todas as misturas dos concretos, foi feita a composição dessas misturas, em proporções percentuais utilizadas nas formulações e traçada a curva granulométrica correspondente. Desse modo, na tabela 5.11, apresenta-se as três composições granulométricas de argilas elaboradas em conformidade com os seguintes percentuais:

- ✓ 60% de argila AE-0500 e 40% de argila AE-1506;
- ✓ 70% de argila AE-0500 e 30% de argila AE-1506
- ✓ 80% de argila AE-0500 e 20% de argila AE-1506.

A última composição foi utilizada para todos os concretos estruturais leves autoadensáveis.

TABELA 5.11 – Composição granulométrica das misturas dos agregados leves AE-0500 e AE-1506 (NBR NM 248, 2003).

Abertura da peneira	% Ret. Acumulada		
	MISTURA 60-40	MISTURA 70-30	MISTURA 80-20
19 mm	0	0	0
12,5 mm	1,6	1,2	0,8
9,5 mm	6,5	4,9	3,2
6,3 mm	12,6	9,4	6,3
4,75 mm	17,2	13,7	10,1
2,36 mm	46,1	43,8	41,6
1,18 mm	70,2	69,0	67,8
600 µm	85,7	85,2	84,6
300 µm	95,2	95,1	94,9
150 µm	99,5	99,6	99,6
Resíduo	100	100	100
D _{máx}	12,5	9,5	9,5
MF	4,20	4,11	4,02

Na figura 5.8, visualiza-se as curvas granulométricas para as três composições de mistura das argilas expandidas, juntamente com as granulometrias individuais de cada argila.

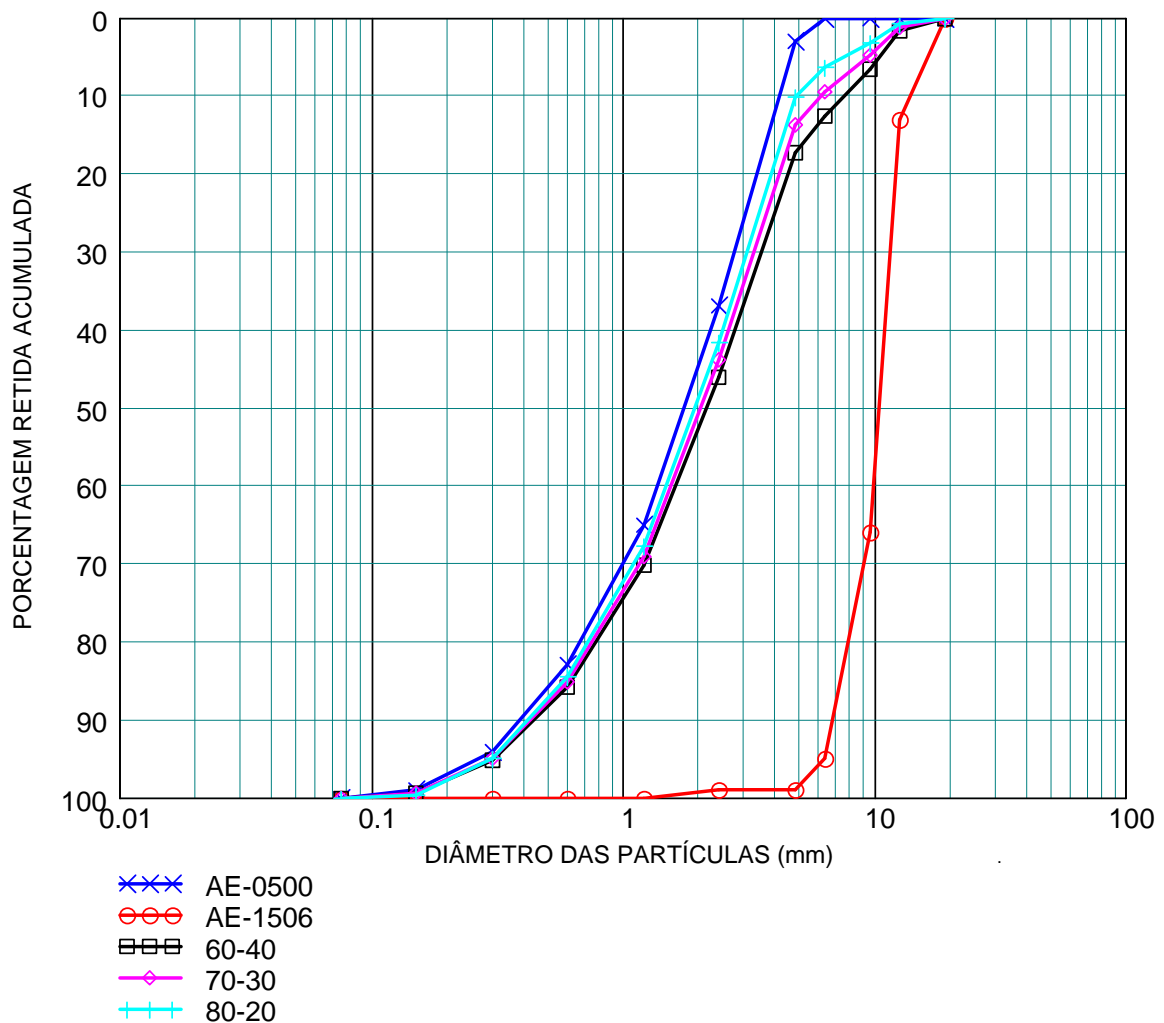


FIGURA 5.8 – Curvas granulométricas das misturas dos agregados leves e curvas granulométricas individuais da AE-0500 e AE-1506 (NBR NM 248, 2003).

Com base nos dados apresentados, não foram identificadas diferenças significativas para as composições granulométricas estudadas. Para esta análise, como esperado, a curva da mistura 60-40 apresenta-se de forma mais suave, sugerindo uma continuidade na distribuição dos grãos. No entanto, a curva da mistura 80-20, por aproximar-se da granulometria da argila AE-0500, torna esta mistura, dentre as composições estudadas, como a mais adequada para uso em concretos autoadensáveis.

Os compostos químicos, em forma de óxidos, foram obtidos por ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X, determinadas no LPMR do IFRN, conforme dados apresentados na tabela 5.12.

TABELA 5.12 – Composição química das argilas AE-0500 e AE-1506.

Oxidos	AE-0500	AE-1506	Limites Químicos (%)
	(%)	(%)	
SiO ₂	55,42	55,12	50 - 60
Al ₂ O ₃	23,73	25,12	16 - 20
Fe ₂ O ₃	9,58	9,37	5 - 9
K ₂ O	5,53	5,08	1,5 - 4,5
Na ₂ O	-	-	Quantidade de Álcalis
MgO	2,20	2,15	1,5 - 3,5
SO ₃	1,31	1,27	-
TiO ₂	1,16	0,86	-
BaO	0,19	0,54	-
CaO	0,67	0,37	1 - 4
S	-	-	0 - 1,5
Perda ao fogo	-	-	6-8

Ferraz e Prizskulnik (2003), citando a norma francesa, relatam que o teor de enxofre (SO₃) deve ser inferior a 15% para agregados destinados a concretos como isolante térmico e inferior a 1% para concretos estruturais. Com base na tabela acima, as argilas deste estudo apresentaram teores de SO₃ próximos de 1%.

Na figura 5.9 e 5.10 estão apresentados os difratogramas das argilas AE-0500 e AE-1506, respectivamente. Analisando-se estas figuras, percebe-se que praticamente não houve diferença entre as fases químicas, destacando-se como fases principais a sílica (SiO₂) e óxido de alumínio e magnésio [Mg(SiO₄)] na forma de espinélio, que se trata de uma substância inorgânica obtida sinteticamente por sinterização com elevada estabilidade térmica.

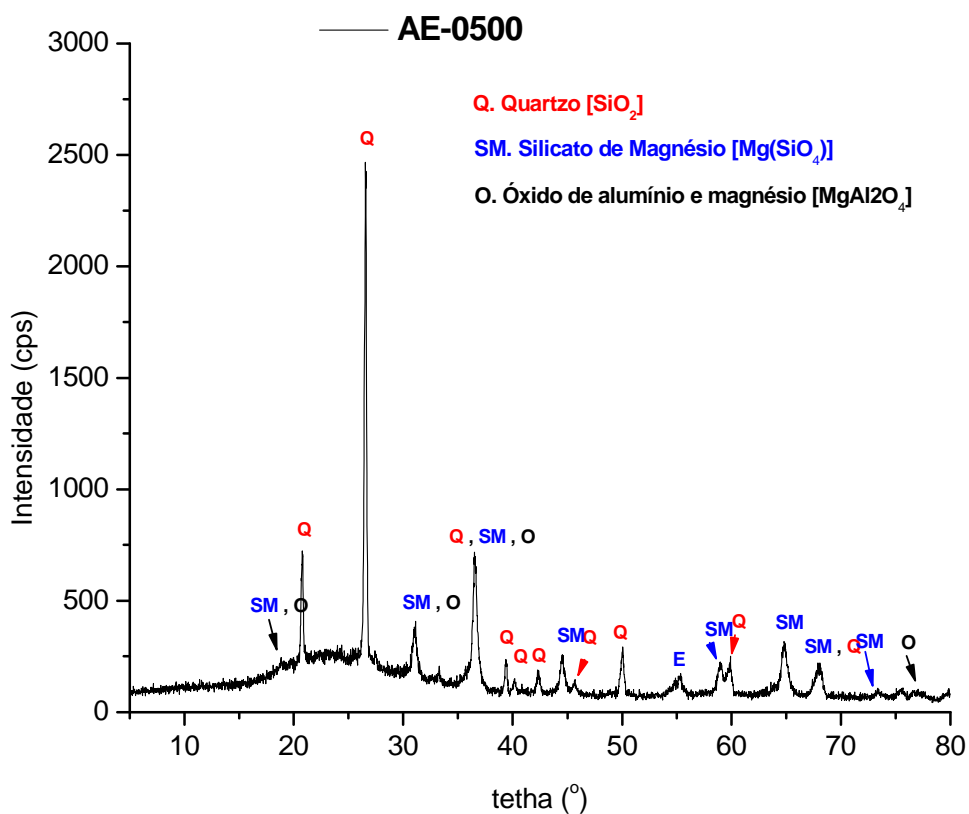


FIGURA 5.9 – Difratoograma de raios X da argila AE-0500.

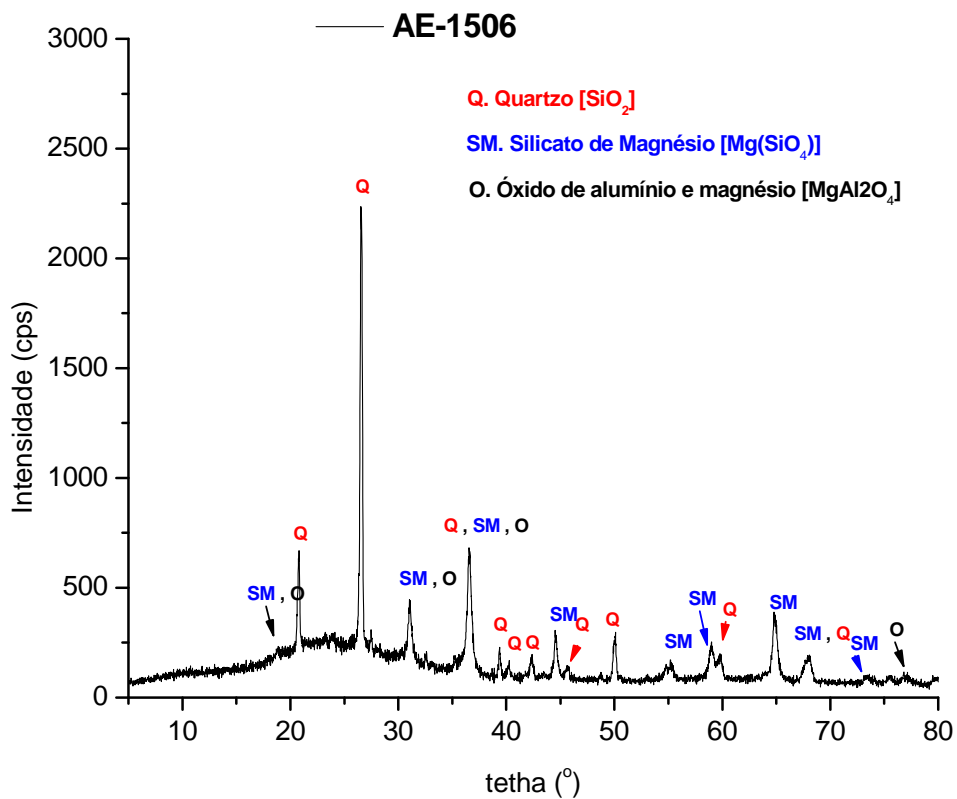


FIGURA 5.10 – Difratoograma de raios X da argila AE-1506.

Na figura 5.11 e 5.12 está apresentada a micrografia da argila AE-0500 e 1506, respectivamente. As imagens foram obtidas por MEV, em duas magnitudes distintas.

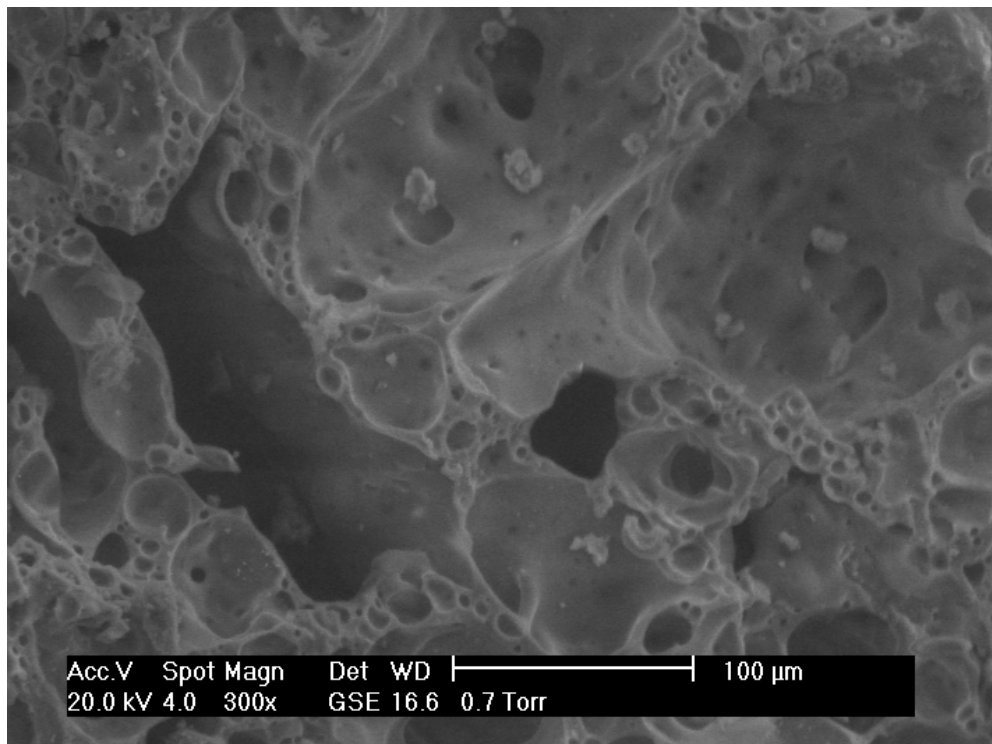


FIGURA 5.11 – Micrografia da estrutura interna da argila AE-0500.

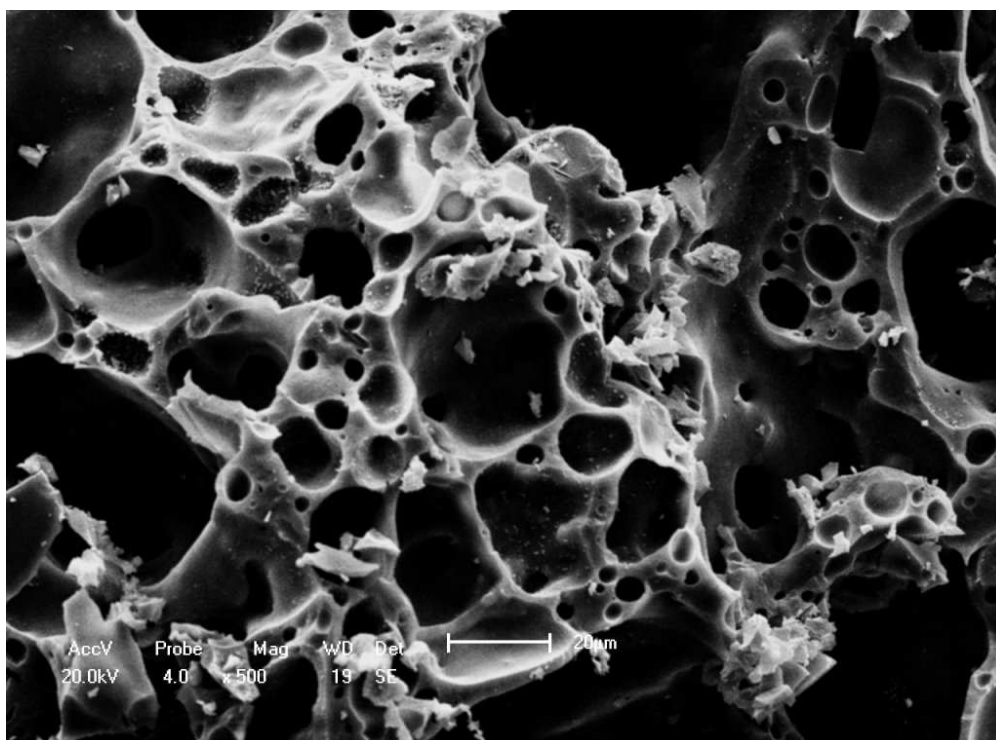


FIGURA 5.12 – Micrografia da estrutura interna da argila AE-1506.

Visualiza-se, em ambas as figuras, que a superfície interna apresenta grandes quantidades de poros não interconectados. Como destaca Moravia *et al.* (2006), a maior porosidade da superfície interna está relacionada ao surgimento de bolhas de gases originados no processo de fabricação da argila expandida.

5.1.5 Agregado miúdo – areia natural quartzosa

Na tabela 5.13, apresenta-se as propriedades físicas da areia, determinadas em conformidade com a norma NBR NM 52 (2003). Na tabela 5.14 e figura 5.13 apresentam-se a composição granulométrica do agregado miúdo. O agregado miúdo enquadra-se parcialmente na zona utilizável, ficando fora da faixa limítrofe as porcentagens referentes às peneiras de abertura 600 μm e 1,18 mm. No entanto, como explicita a norma, pode-se utilizar agregado miúdo diferente das zonas estabelecidas, uma vez que a areia comprovou sua aplicabilidade na produção dos concretos produzidos neste estudo, atendendo, inclusive, aos requisitos quanto à presença de substâncias nocivas aos concretos.

TABELA 5.13 – Propriedades físicas do agregado miúdo (areia).

Propriedades	Areia	Norma
Massa Unitária	1570 (kg/m ³)	NBR NM 52 (2003)
Massa Específica	2640 (kg/m ³)	NBR NM 52 (2003)

TABELA 5.14 – Análise granulométrica do agregado miúdo (NBR NM 248, 2003).

Abertura da peneira	AREIA		
	Material Retido (g)	% Ret. Acumulada	ZONA UTILIZÁVEL (NBR 7211, 2005)
6,3 mm	0,0	0	0 – 7
4,75 mm	0,0	0	0 – 10
2,36 mm	0,0	0	0 – 25
1,18 mm	0,0	0	5 – 50
600 µm	8,0	0	15 – 70
300 µm	1406,0	71	50 – 95
150 µm	532,0	97	85 – 100
Resíduo	54,0	100	-
Total	2000,0	-	-
Dimensão máxima característica			600 µm
Módulo de Finura			1,68

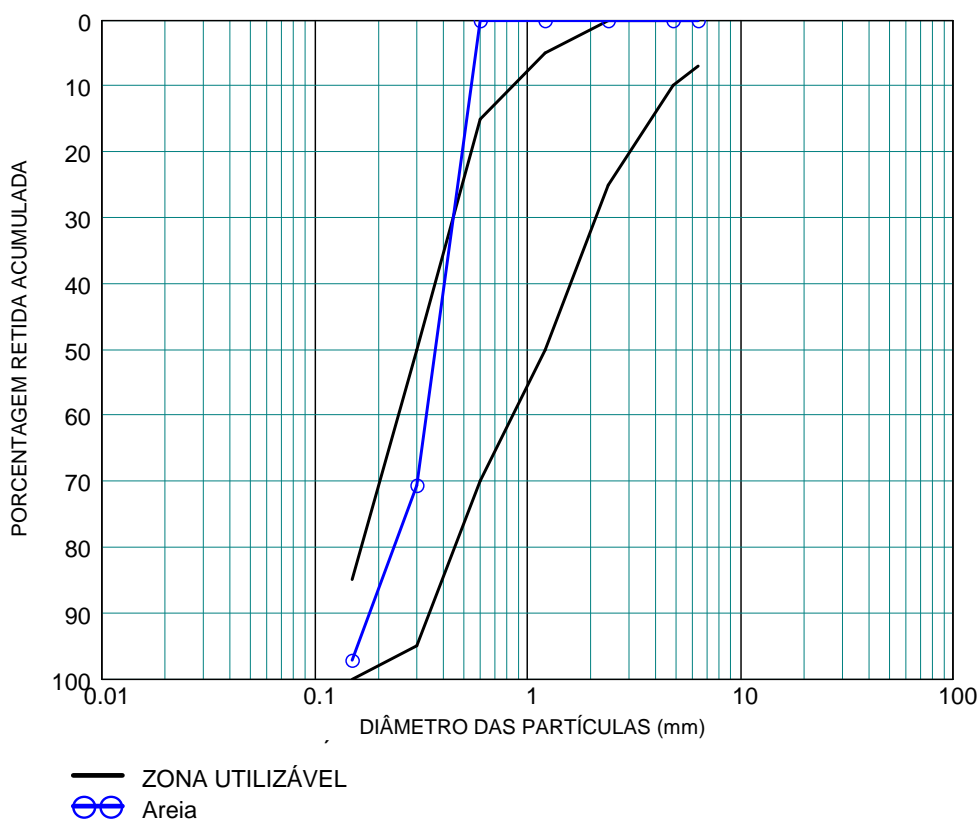


FIGURA 5.13 – Curva e faixa granulométrica do agregado miúdo.

5.2 Concreto estrutural leve (CEL)

5.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco

Os aspectos relativos ao processo de produção do concreto (mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura) influenciam diretamente no desempenho final do concreto, principalmente os parâmetros de estabilidade, resistência e durabilidade, preestabelecidos na fase de projeto, conforme prevê a NBR 6118 (2003). As propriedades que determinam este comportamento do concreto no estado fluido são a trabalhabilidade e massa específica, inclusive no que se refere a uma maior possibilidade de redução de volume de vazios.

Na confecção dos corpos de prova, não foram observados os fenômenos de exsudação e segregação no concreto leve, uma vez que se obedeceu cuidadosamente a Norma NBR NM 67 (1998).

5.2.1.1 Consistência

Há vários ensaios que dão uma noção da trabalhabilidade do concreto, visto que nenhum dá uma medida direta dessa qualidade. Para a primeira etapa desta pesquisa, adotou-se o ensaio mais tradicional e comumente aplicado, que é o ensaio de abatimento do tronco de cone.

Na tabela 5.15, apresenta-se os resultados do abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, 1998), para as três dosagens de concreto estruturais leves analisadas.

TABELA 5.15 – Abatimento do tronco de cone (NBR NM 67, 1998).

CONCRETO	Slump (mm)
CEL 60-40	145
CEL 70-30	100
CEL 80-20	95

Para os procedimentos de dosagem utilizados, com base no método proposto pelo ACI 211.2-98, apenas os concretos CEL 70-30 e CEL 80-20 obtiveram valores de *slump* dentro do estimado, que eram de 75 mm a 100 mm.

A diferença entre os valores de consistência do concreto CEL 60-40 para os demais concretos pode ser atribuída à maior quantidade de argila AE-1506 na sua composição (40% de AE-1506) do que nos demais concretos (30% no CEL 70-30 e 20% no CEL 80-20), ocasionando rolamento entre suas partículas durante a realização do ensaio devido sua forma mais arredondada e superfície vítrea que a argila AE-0500. A formulação CEL 70-30 e CEL 80-20 apresentaram abatimentos próximos entre si, com diferença pouco significativa.

É importante enfatizar que foram realizadas várias misturas para otimização das quantidades dos materiais constituintes, inclusive com variações na relação água/cimento. Nestas misturas iniciais foram realizados ensaios de abatimento (no estado fresco) e de resistência à compressão. Assim, após observações favoráveis relacionadas às características visuais do concreto no estado fresco (sem exsudação ou segregação) e endurecido (distribuição uniforme dos agregados na massa cimentícia), complementadas com os resultados de resistência, chegou-se então, a primeira mistura do concreto estrutural leve.

Além do processo de adequação das quantidades dos materiais constituintes, descrito acima, as argilas expandidas foram pré-umedecidas antes do procedimento de mistura, contribuindo para a melhoria da consistência e evitando a absorção da água de amassamento, necessária para a trabalhabilidade do concreto.

5.2.1.2 *Massa específica*

A avaliação desta propriedade foi efetuada em 15 amostras para cada dosagem estudada nesta etapa. Na tabela 5.16 apresentam-se os valores médios das massas específicas no estado fresco e seus respectivos coeficientes de variação, em porcentagem.

TABELA 5.16 – Massas específicas dos concretos CEL no estado fresco e seus respectivos coeficientes de variação, em porcentagem.

CONCRETO	Massa Específica Fresca (kg/m ³)
CEL 60-40	1587 (± 2,4%)
CEL 70-30	1609 (± 1,4%)
CEL 80-20	1661 (± 1,6%)

Além da determinação da massa específica no estado fresco, deu-se prosseguimento a sua determinação ao longo do tempo de cura (1, 7, 28 e 91 dias) na medida em que se realizavam os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico, porém, adotando-se nesses momentos, a norma NBR 9778 (2005). As evoluções das massas específicas em relação ao tempo, agora na condição superfície saturada seca, encontram-se especificadas na tabela 5.17, além dos coeficientes de variação medidos.

TABELA 5.17 – Evolução das massas específicas dos concretos CEL, condição superfície saturada seca, e seus respectivos coeficientes de variação, em porcentagem (NBR 9778, 2005).

CONCRETOS		CEL 60-40	CEL 70-30	CEL 80-20
PROPRIEDADES FÍSICAS	ME _{1 dia} (kg/m ³)	1594 (± 2,6%)	1626 (± 1,2%)	1672 (± 1,1%)
	ME _{7 dias} (kg/m ³)	1625 (± 3,1%)	1655 (± 1,7%)	1688 (± 2,1%)
	ME _{28 dias} (kg/m ³)	1627 (± 1,7%)	1684 (± 0,5%)	1725 (± 2,0%)
	ME _{91 dias} (kg/m ³)	1631 (± 2,7%)	1689 (± 0,4%)	1727 (± 2,4%)

À medida que ocorre a hidratação do cimento com o tempo, a formação dos silicatos de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos, em forma de fibras, cristais e placas, contribuem para o aumento da massa específica. Este aumento foi observado em todos os concretos.

O concreto CEL 80-20 foi o que apresentou maior massa específica em todas as idades analisadas, para a condição de superfície saturada seca. Por ter maiores

quantidades da argila AE-0500 na sua composição, este aumento de massa específica, em relação às outras dosagens, já era esperada, uma vez que a argila AE-0500 apresenta maior massa específica que a argila AE-1506.

5.2.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

5.2.2.1 *Absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massas específicas seca, saturada e real*

Para realização destes ensaios foram utilizadas três amostras de concreto cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada mistura. Os ensaios foram realizados após período de cura de 28 dias, e em conformidade com a NBR 9778 (2005).

Na tabela 5.18, ilustram-se os resultados da absorção por imersão, porosidade total, índice de vazios e massas específicas para as formulações CEL 60-40, CEL 70-30 e CEL 80-20. Os valores apresentados são a média de três determinações com seus respectivos desvios padrões (expressos em %).

TABELA 5.18 – Absorção por imersão, porosidade total, índice de vazios e massas específicas, após 28 dias de cura, dos CEL, com seus respectivos desvios padrões expressos em %.

	CONCRETOS	CEL 60-40	CEL 70-30	CEL 80-20
PROPRIEDADES FÍSICAS	$Ab_{IMERSÃO}$ (%)	10,4 (± 0,4%)	8,4 (± 6,6%)	5,5 (± 3,9%)
	P_{TOTAL} (%)	24,0 (± 1,0%)	12,9 (± 6,5%)	8,6 (± 4,3%)
	I_v (%)	15,8 (± 0,8%)	13,2 (± 5,5%)	8,7 (± 4,5%)
	ME_{SECA} (kg/m ³)	1558 (± 1,7%)	1441 (± 0,4%)	1584 (± 1,6%)
	ME_{SAT} (kg/m ³)	1627 (± 1,7%)	1684 (± 0,4%)	1725 (± 2,0%)
	ME_{REAL} (kg/m ³)	1756 (± 2,1%)	1826 (± 1,2%)	1904 (± 0,6%)

A figura 5.14 ilustra os resultados de absorção por imersão, porosidade total e índice de vazios dos concretos CEL.

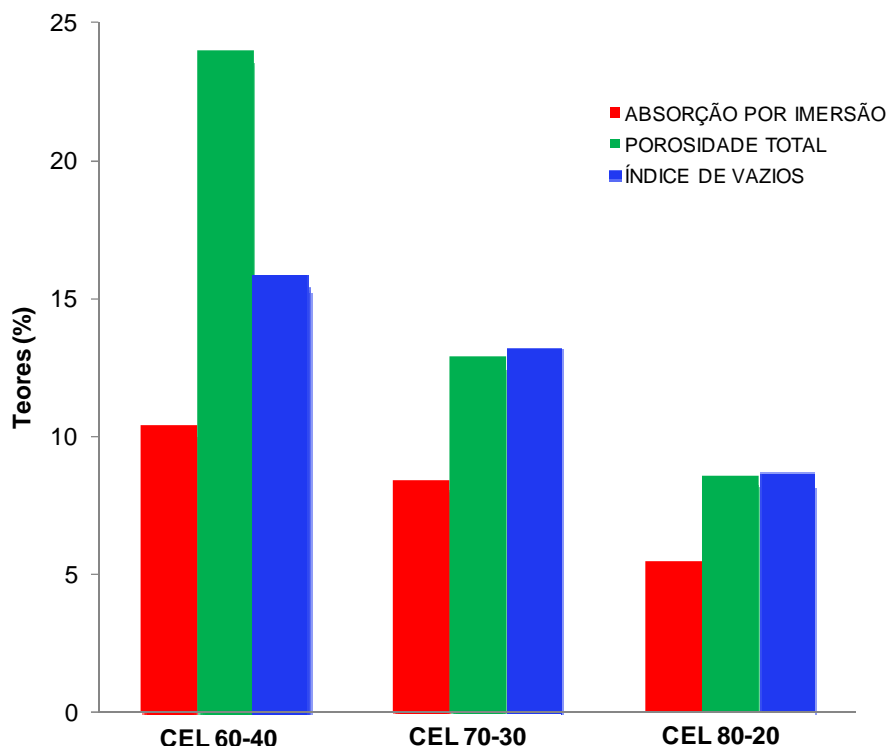


FIGURA 5.14 – Teores de absorção por imersão, porosidade total e índice de vazios, após 28 dias de cura, dos CEL.

A utilização de maior quantidade da argila AE-0500 na composição dos concretos favoreceu na redução da absorção, porosidade e índice de vazios. Tais características estão intrinsecamente relacionadas com a propriedade de durabilidade do concreto, indicando favorecimento nesta propriedade.

Os valores de massa específica real variaram de 1756 kg/m³ a 1904 kg/m³. A utilização de maior quantidade da argila AE-0500 na composição dos concretos ocasionou aumento das massas específicas dos concretos, como esperado. Porém, comparando-se as massas específicas reais dos concretos analisados com a massa específica real de um concreto convencional (~ 2500 kg/m³), os concretos leves apresentaram redução cerca de 23% a 29%.

5.2.2.2 Absorção por capilaridade

As três amostras utilizadas nos ensaios de absorção de água por capilaridade foram corpos-de-prova de concreto cilíndricos de dimensões de 100 x 200 mm, com idade de 28 dias, para cada mistura. Os ensaios foram realizados no Laboratório Construção Civil (IFRN), com base nos procedimentos indicados na NBR 9779 (ABNT, 1995).

Na tabela 5.19 encontram-se os resultados de absorção por capilaridade para os concretos estruturais leves medidos no 1º dia, 2º dia e 3º dia.

TABELA 5.19 – Evolução da absorção por capilaridade dos CEL.

CONCRETOS	CEL 60-40	CEL 70-30	CEL 80-20	
CAPILARIDADE (g/cm ²)	24 h	0,82	0,86	0,74
	48 h	1,01	1,01	0,95
	72 h	1,10	1,07	1,01

Observa-se que o concreto CEL 80-20 foi o que apresentou menores valores de absorção por capilaridade, porém a diferença entre estes concretos não demonstrou ser significativa, uma vez que, em termos percentuais, representa uma variação de apenas 8%, após o período de 72 horas.

5.2.2.3 Resistência à compressão axial (f_c)

No ensaio de ruptura para determinação da resistência à compressão, todos os corpos-de-prova de todos os concretos CEL apresentaram fissuras de rompimento de forma colunar e atravessando o agregado leve, devido a sua fragilidade frente a maior rigidez da matriz cimentícia, como pode ser observada figura 5.15.

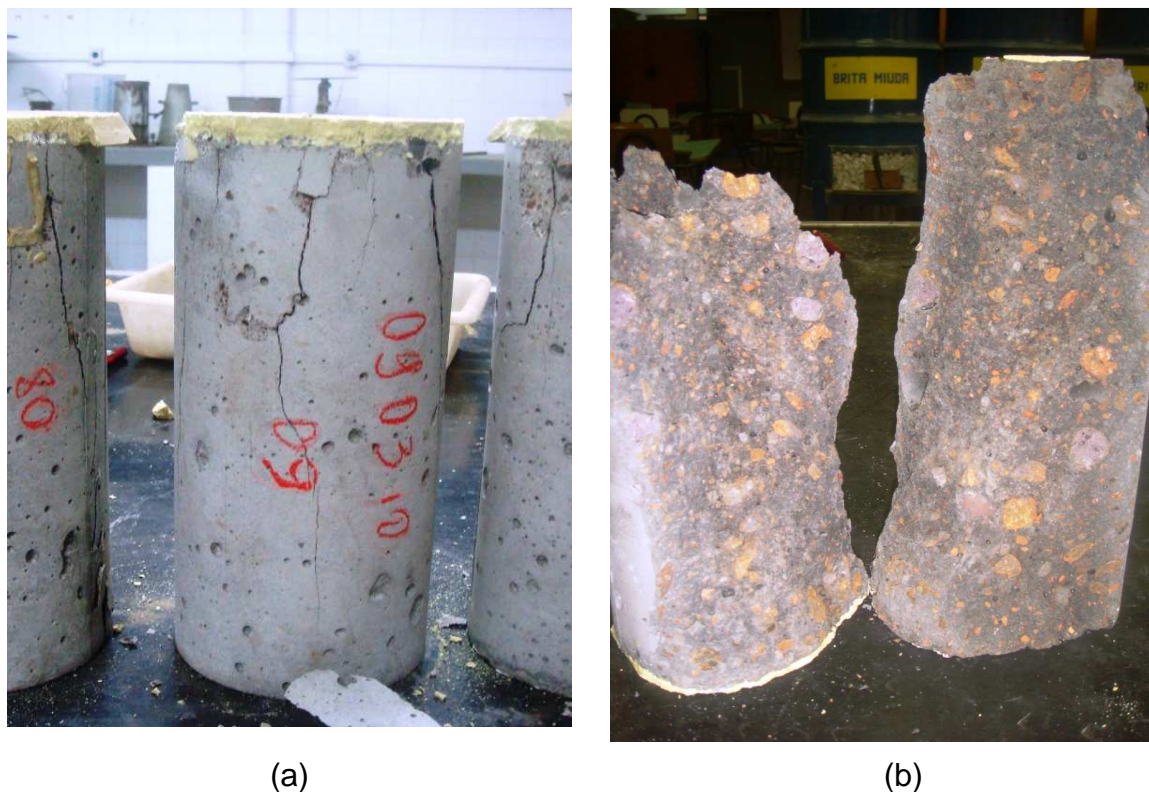


FIGURA 5.15 - Ilustração de corpos-de-prova após ensaio de resistência à compressão axial dos concretos CEL: fissuras de ruptura modo colunar (a) e ruptura dos agregados leves (b).

Para análise dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial, foram considerados apenas os valores situados dentro da margem de desvio máximo relativo, ou seja, a diferença entre o maior e o menor valor obtido dividido pela média dos valores, resultantes menores que 10%.

Na tabela 5.20 apresentam-se os resultados médios das resistências à compressão, com relação ao tempo de cura, além da relação entre as resistências obtidas a 1, 7 e 91 dias com a resistência aos 28 dias e os coeficientes de variação, em porcentagem.

TABELA 5.20 – Resistência à compressão axial (f_c) e relações entre as resistências $f_{c, j\text{dias}}/f_{c, 28\text{dias}}$.

Resistência à compressão axial (f_c), em MPa	CONCRETOS		
	CEL 60-40	CEL 70-30	CEL 80-20
$f_{c, 1\text{dia}}$	3,22 ($\pm 9,9\%$)	3,92 ($\pm 8,8\%$)	2,98 ($\pm 7,34\%$)
$f_{c, 1\text{dia}} / f_{c, 28\text{dias}}$	0,16	0,17	0,12
$f_{c, 7\text{dias}}$	15,20 ($\pm 3,4\%$)	17,32 ($\pm 6,3\%$)	20,31 ($\pm 4,2\%$)
$f_{c, 7\text{dias}} / f_{c, 28\text{dias}}$	0,73	0,74	0,79
$f_{c, 28\text{dias}}$	20,71 ($\pm 2,6\%$)	23,53 ($\pm 1,7\%$)	25,43 ($\pm 3,2\%$)
$f_{c, 91\text{dias}}$	23,43 ($\pm 5,3\%$)	23,17 ($\pm 1,9\%$)	25,94 ($\pm 3,2\%$)
$f_{c, 91\text{dias}} / f_{c, 28\text{ dias}}$	1,13	0,98	1,02

Na figura 5.16 ilustra-se, em forma de gráfico, a evolução da resistência com o tempo para os três concretos CEL.

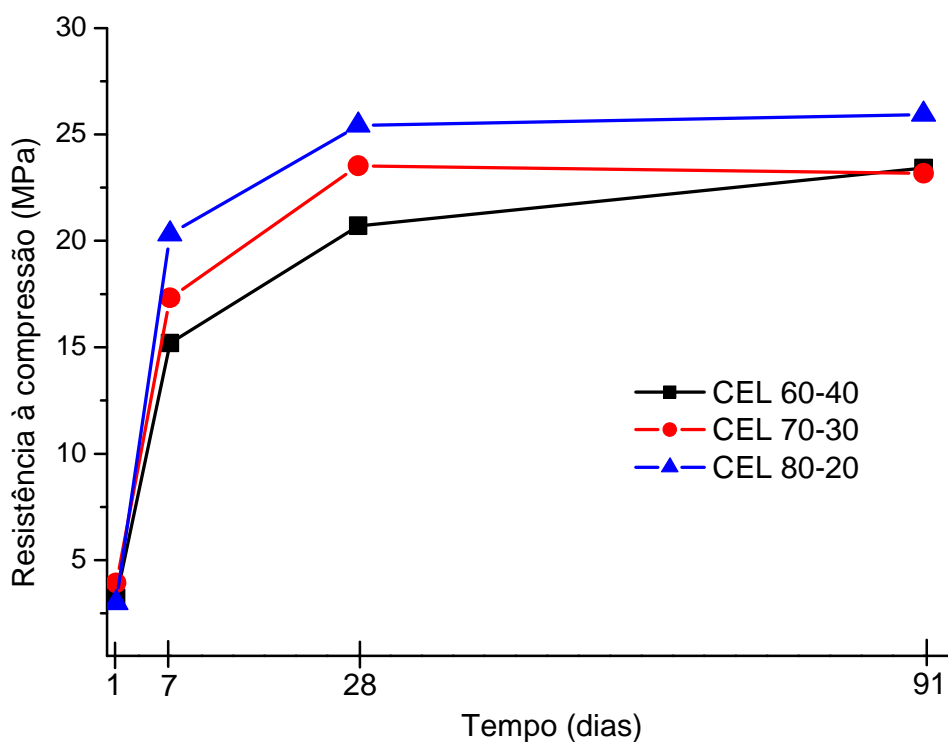


FIGURA 5.16 – Evolução da resistência à compressão axial (f_c), com relação ao tempo de cura, para os CEL.

Comparando-se os valores da resistência à compressão axial dos concretos estruturais leves, verifica-se que as três formulações atingiram a resistência mínima para concreto estrutural pela NBR 6118 (NBR, 2003) de 20 MPa, aos 28 dias, como também a mínima exigida pelo ACI de 17 MPa.

Observou-se aumento na resistência à compressão para os concretos com maiores quantidades da argila AE-0500 presente na mistura. A formulação CEL 80-20 foi a que atingiu maior valor de resistência à compressão aos 28 dias.

Considerando-se apenas os valores médios de resistência das amostras com tempo de cura de 28 dias, tem-se uma diferença de aproximadamente 23% entre a formulação de maior (CEL 80-20) e menor (CEL 60-40) resistência.

Infere-se, com base nesta análise, que o uso de agregados de maiores dimensões, presentes em maior quantidade no CEL 60-40, por apresentarem baixa resistência mecânica, limita a resistência neste tipo de concreto. Silva (2007) e Meyer e Kahn (2002), argumentam que este problema pode ser minorado através da utilização de agregado de menor dimensão característica em substituição ao de maior dimensão, mesmo conduzindo, na maior parte das vezes, a um aumento da massa específica, corroborando assim, com os resultados obtidos nos ensaios de massa específica (tabela 5.18) e resistência à compressão (tabela 5.20).

Na figura 5.17 ilustra-se, em forma de gráfico, a relação entre as massas específicas real e a resistência à compressão para os concretos CEL, aos 28 dias de cura. Nesta figura, evidenciam-se os argumentos acima citados, com aumento da resistência em concretos com maiores massas específicas.

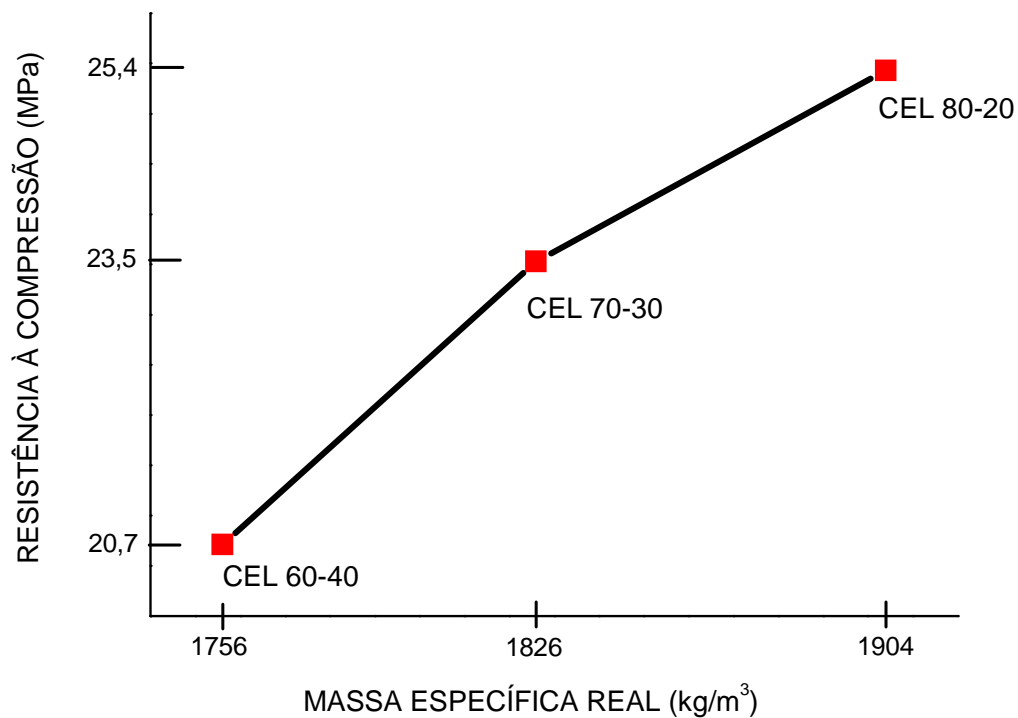


FIGURA 5.17 – Relação entre a massa específica real e resistência à compressão axial dos concretos CEL, aos 28 dias de idade.

5.2.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

Na tabela 5.21 apresentam-se os módulos de elasticidade dinâmico, em GPa, e as relações entre os módulos obtidos no dia do ensaio ($E_{d, j\text{dias}}$) e os módulos obtido aos 28 dias ($E_{d, 28\text{dias}}$).

Na figura 5.18 ilustram-se, em forma de gráfico, a evolução do E_d com o tempo de cura.

TABELA 5.21 – Módulos de elasticidade dinâmico e relações entre os módulos $E_{d, j\text{dias}}/E_{d, 28\text{dias}}$.

Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), em GPa			
DOSAGENS	CEL 60-40	CEL 70-30	CEL 80-20
$E_{d, 1\text{dia}}$	11,83	12,33	12,58
$E_{d, 1\text{dia}} / E_{d, 28\text{dias}}$	0,67	0,71	0,68
$E_{d, 7\text{dias}}$	16,08	17,43	17,93
$E_{d, 7\text{dias}} / E_{d, 28\text{dias}}$	0,92	0,97	0,97
$E_{d, 28\text{dias}}$	17,54	18,02	18,54
$E_{d, 91\text{dias}}$	18,05	18,33	18,56
$E_{d, 91\text{dias}} / E_{d, 28\text{dias}}$	1,03	1,02	1,00

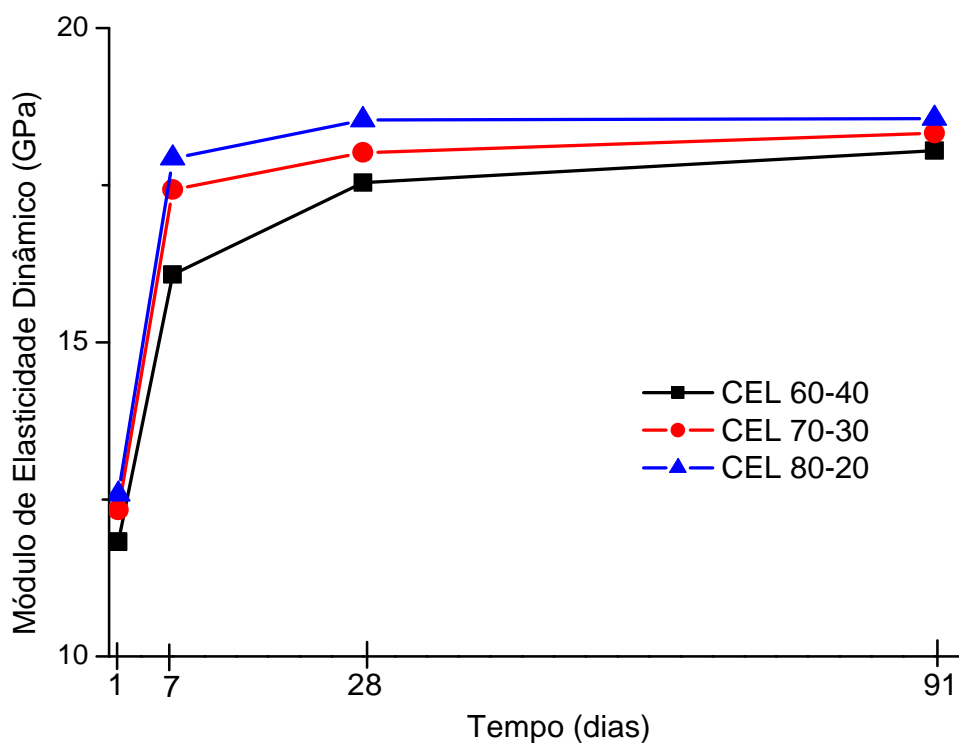


FIGURA 5.18 – Módulos de elasticidade dinâmico, em função da idade, dos concretos estruturais leves.

Observa-se que os valores do módulo de elasticidade dinâmico obtidos para os concretos estruturais leves apresentaram acréscimo com a evolução do tempo.

Para as três dosagens estudadas nesta etapa, não se constata variações no módulo de elasticidade dinâmico. Este comportamento confirma a premissa do ACI 213 de que variações na graduação do agregado leve, geralmente, têm pouco efeito no módulo de elasticidade, desde que a relação entre a pasta de cimento e agregados permaneçam constantes, como ocorre nas dosagens estudadas, que têm relação cimento-materiais secos constantes e iguais a 0,48.

5.2.3 Propriedades de durabilidade

5.2.3.1 Permeabilidade a gás nitrogênio

Na tabela 5.22 apresentam-se os valores de permeabilidade a gás nitrogênio obtidos em duas amostras para cada concreto e a média aritmética com seus respectivos coeficientes de variação em porcentagem.

TABELA 5.22 – Valores de coeficientes de permeabilidade a gás nitrogênio, em m^2 , observados nos CEL.

CONCRETO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE k (m^2)		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	Média e coeficiente de variação
CEL 60-40	$1,18 \times 10^{-16}$	$1,38 \times 10^{-16}$	$1,28 \times 10^{-16}$ ($\pm 7,8\%$)
CEL 70-30	$1,00 \times 10^{-16}$	$1,06 \times 10^{-16}$	$1,03 \times 10^{-16}$ ($\pm 2,9\%$)
CEL 80-20	$0,62 \times 10^{-16}$	$0,76 \times 10^{-16}$	$0,69 \times 10^{-16}$ ($\pm 10,5\%$)

Com base nos dados apresentado na tabela acima, o concreto que apresentou menor coeficiente de permeabilidade foi CEL 80-20, apresentando valor superior ao especificado por Ben-Othman e Buenfeld (1990) para concretos leves com argilas expandidas produzidas na Europa ($0,4$ a $0,5 \times 10^{-16} m^2$), conforme dados exibidos na tabela 3.2. Porém, os concretos CEL 70-30 e CEL 80-20 obtiveram coeficientes de permeabilidade a gás nitrogênio inferiores aos especificados para concreto convencional produzido com agregado graúdo granítico (brita), que é

aproximadamente $1,0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, segundo estes autores. Reforça-se esta análise com os estudos desenvolvidos por Holm e Brenner (1994), Lo *et al.* (2003) e Zhang e Gjorv (1990), que também observaram que os concretos estruturais leves apresentam permeabilidade a líquido e gases semelhantes ou inferiores à observada nos concretos convencionais, para o mesmo nível de resistência.

Observa-se ainda que à medida que se aumentava a concentração da argila AE-0500 no concreto, o coeficiente de permeabilidade diminuía. Este fenômeno pode ser atribuído ao aumento da massa específica do concreto, que por ser mais denso, dificulta o transporte de gases ou líquidos através da sua massa endurecida, e, como consequência, torna-o mais durável e resistente.

5.2.4 Comparação entre os concretos dosados estudados

Analisando as misturas CEL 60-40, CEL 70-30 E CEL 80-20, constata-se que, no estado fresco, o concreto CEL 60-40 foi a mistura que atingiu maior índice de trabalhabilidade, constatado através do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), ficando as outras duas com valores próximos entre si e, com relação à massa específica, a mistura CEL 80-20 foi a que atingiu maior valor e a mistura CEL 60-40, a de menor valor, porém a diferença entre essas massas específicas ficou próximo de 5%.

No estado endurecido, todas as misturas atingiram resistência mínima exigida para concreto estrutural leve segundo a norma brasileira NBR 6118 (2003), sendo que o CEL 80-20, aos 28 dias, apresentou um valor cerca de 18% maior que o CEL 60-40 e 7% maior que o CEL 70-30. Considerando ainda o tempo de cura aos 28 dias, todos os concretos apresentaram valores de módulos de elasticidade dinâmico próximos entre si, não sendo observada diferença significativa nesta propriedade dos concretos. Tomando como base as características intrínsecas de durabilidade (absorção por imersão, porosidade total, absorção por capilaridade e permeabilidade a gás nitrogênio), o CEL 80-20 foi o que apresentou melhores valores, com destaque para o coeficiente de permeabilidade, com uma redução de 46%, em relação ao CEL 60-40, e 33% em relação ao CEL 70-30.

Assim, focando-se nas propriedades de maior relevância (massa específica real, resistência à compressão e durabilidade), pode-se considerar que a mistura CEL 80-20 foi a que se sobressaiu com melhor desempenho, podendo-se ainda justificar a sua escolha para estudo como concreto leve autoadensável por conter maiores quantidades de partículas reduzidas (AE-0500) na sua composição. Fato este essencial na dosagem de concretos autoadensáveis.

5.3 Concreto estrutural leve autoadensável (CELA)

5.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco

5.3.1.1 Reologia

Neste subitem, procura-se fazer uma análise dos testes realizados nos concretos estruturais leves autoadensáveis no estado fresco em comparação com os valores especificados na nova Norma Brasileira (NBR 15823, 2010) e suas implicações práticas. Três ensaios são utilizados com maior frequência e adotados nesta pesquisa: ensaio no funil “V”, fluxo no cone de Abrams (*Slump-flow test*) e fluxo na caixa “L”.

Na tabela 5.23 apresentam-se os resultados dos ensaios de trabalhabilidade realizados para o CELA.

TABELA 5.23 – Ensaio de trabalhabilidade dos CELA.

CONCRETOS		Slump flow T ₅₀₀ (seg)	Slump flow test (mm)	Caixa “L” (H2/H1)	Funil “V” (seg)
TRABALHABILIDADE	CELA 00M-00C	3,76	560	0,83	5,39
	CELA 05M-05C	5,38	610	0,88	4,87
	CELA 10M-00C	4,95	620	0,90	5,10
	CELA 00M-10C	8,87	550	0,75	5,33
	CELA 00M-20C	4,54	600	0,81	4,17

As análises dos resultados da tabela acima estão pontuadas visando os preceitos especificados nos quatro parâmetros principais e necessários para qualificação como concreto autoadensável, apresentados a seguir:

- **Fluidez e escoamento (SF) – Ensaio: *slump flow test***

Com base na NBR 15823 (2010), tabela 2.11, comprova-se que os valores de espalhamento (*slump flow test*), que determina a capacidade de fluidez e escoamento, observados nos CELA, atingiram o nível de auto-adensabilidade especificado para a classe SF1, com exigência de valores entre 550 mm e 650 mm (figura 5.19).



FIGURA 5.19 – Medição do diâmetro de espalhamento (*slump-flow test*).

- **Viscosidade plástica aparente (VF ou VS) – Ensaio: t_{500} e funil “V”**

Com relação à viscosidade plástica aparente (VF ou VS), a exigência da classe VS 2 é que o tempo necessário para que o espalhamento no tronco de cone atinja o diâmetro de 500 mm seja superior a 2 segundos. Deste modo, levando em consideração os resultados obtidos apenas para este ensaio, todos os concretos atingiram esta exigência (figura 5.20). Porém, para este parâmetro, exige-se, também, a qualificação da classe VF, que trata especificamente dos resultados do ensaio com o funil “V”.

Todos os concretos foram classificados como VF1 por apresentarem tempo de escoamento inferior a 8 segundos (figura 5.21).



FIGURA 5.20 – Ensaio de espalhamento (*slump flow* t_{500}).



FIGURA 5.21 – Ensaio de escoamento - funil “V”.

- **Habilidade passante (PL ou PJ) – Ensaio: caixa “L”**

Esta habilidade do concreto foi medida através do ensaio da caixa “L”, que simula a capacidade do concreto fresco fluir através de espaços confinados e estreitos, simulando áreas de elementos estruturais com altas densidades de armadura. A relação entre as alturas medidas na caixa “L” (H_2/H_1), conforme resultados apresentados na tabela 5.23, desqualifica o concreto CELA 00M-10C desta capacidade, uma vez que a norma exige, para a classe PJ1 e PJ2, que esta relação seja maior que 0,80 com equipamento composto de 3 barras de aço (figura 5.22). Ressalta-se que, nesse momento, poderia ter sido feito um ajuste do traço acrescentando mais plastificante e ou superplastificante para atingir esta exigência. No entanto, esta alteração também poderia ocasionar o surgimento de fenômenos indesejáveis no concreto, como exsudação e ou segregação.

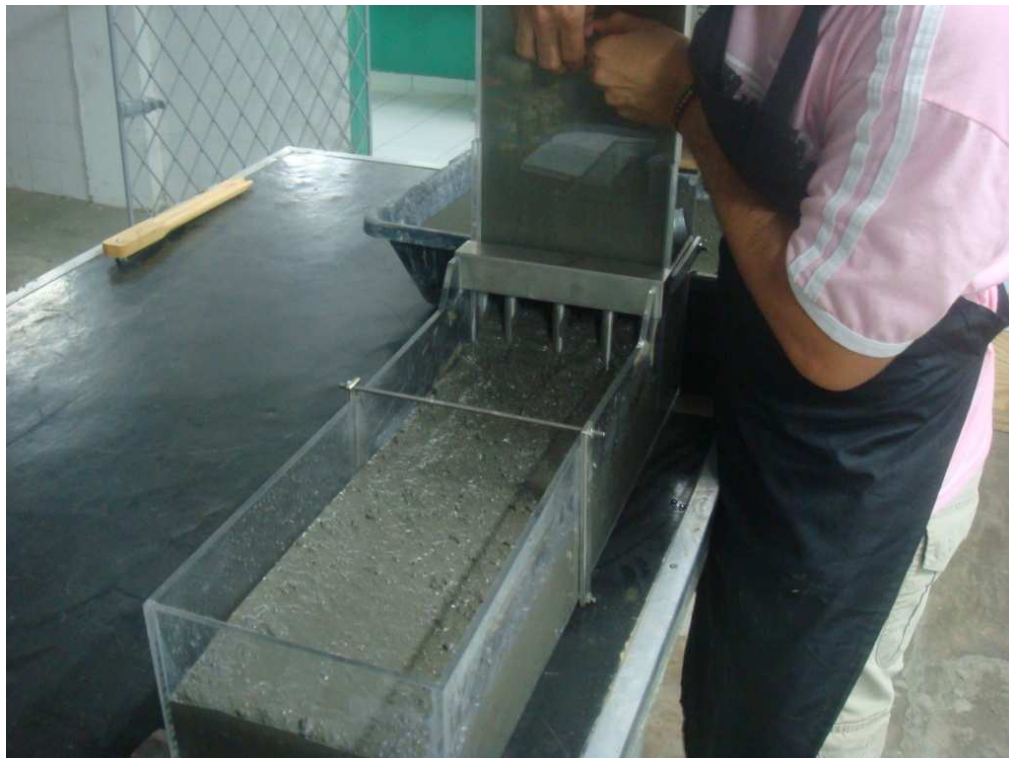


FIGURA 5.22 – Ensaio da caixa “L” (medição da habilidade passante).

- **Resistência à segregação (SR)**

Para análise deste parâmetro, nenhum ensaio foi realizado, pois na época da realização dos ensaios dos concretos no estado fresco, a Norma Brasileira ainda não estava em vigor.

O controle dos fatores que influenciam o comportamento reológico dos concretos autoadensáveis permite determinar suas características de aplicação. Assim, frente às aplicações possíveis em consonância com os resultados obtidos, pode-se atribuir que os concretos analisados aplicam-se a execução de elementos estruturais, com maior adequabilidade para lajes e vigas.

Argumenta-se também, que apresentam compatibilidade de comportamento reológico como um concreto autoadensável, mesmo faltando a complementação do ensaio de análise da resistência à segregação.

No entanto, não se pode atribuir o comportamento do concreto apenas pela mensuração de um ensaio para desqualificá-lo como autoadensável, uma vez que os resultados dos demais ensaios enquadraram-se nas exigências normativas, inferindo-se que, de forma qualitativa, todos os concretos, de maneira geral, apresentaram parâmetros reológicos necessários para cumprir os requisitos de trabalhabilidade como concreto estrutural leve autoadensável.

Reforça-se que todos os concretos, após mistura, apresentaram-se de forma coesa e sem ocorrência de segregação, como ilustrado na figura 5.23.



FIGURA 5.23 – Ilustração dos concretos CELA no estado fluido.

5.3.1.2 *Massa específica*

A avaliação da massa específica do concreto no estado fresco foi realizada em todas as amostras confeccionadas. Na tabela 5.24 apresentam-se os valores das massas específicas no estado fresco e seus respectivos coeficientes de variação, em porcentagem. O valor apresentado para cada dosagem é a média aritmética de quinze determinações.

TABELA 5.24 – Massas específicas no estado fresco dos CELA.

CONCRETO	Massa Específica Fresca (kg/m ³)
CELA 00M-00C	1746 (± 1,4%)
CELA 05M-05C	1749 (± 1,2%)
CELA 10M-00C	1720 (± 2,1%)
CELA 00M-10C	1724 (± 1,4%)
CELA 00M-20C	1733 (± 2,9%)

Com base nos dados apresentados, percebe-se que os resultados de todas as misturas permaneceram praticamente iguais, com diferença entre o valor máximo e o mínimo de massa específica no estado fresco de aproximadamente 2%, em relação à média. Deste modo, a inclusão das adições minerais em substituição do cimento não alterou, de maneira significativa, as massas específicas no estado fresco.

5.3.1.3 Teor de ar incorporado

Apesar de a Norma NM 47 (2002) ser clara na não aplicabilidade deste ensaio para concretos preparados com agregados leves, sua determinação foi realizada objetivando parâmetros indicadores da influência (redução ou aumento do teor de ar) da inclusão de adições minerais nestes concretos, uma vez que a análise comparativa se dará com os concretos fabricados com a mesma proporção de agregados leves e nas mesmas condições de mistura.

Assim, a tabela 5.25 ilustra os valores dos teores de ar incorporado medidos nos CELA. Os valores apresentados referem-se a apenas uma única determinação através deste ensaio.

TABELA 5.25 – Teor de ar incorporado dos CELA.

CONCRETO	Teor de ar incorporado (%)
CELA 00M-00C	4,6
CELA 05M-05C	3,2
CELA 10M-00C	2,2
CELA 00M-10C	2,6
CELA 00M-20C	3,4

Para os concretos fabricados, observa-se uma redução do teor de ar incorporado em todos os concretos que contêm adições minerais na sua composição, quando comparados ao concreto sem adições (CELA 00M-00C), com maior expressividade no concreto que contém só metacaulim na sua composição

(CELA 10M-00C). De certa forma, a incorporação de adições minerais contribuiu com a redução do teor de ar e, conseqüentemente, ocasionando um maior adensamento dos materiais constituintes, tornando-os mais compactos (densos) e duráveis.

5.3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido

5.3.2.1 *Absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massas específicas seca, saturada e real*

Para realização destes ensaios foram utilizadas três amostras de concreto cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada mistura. Os ensaios foram realizados após período de cura de 28 dias, e em conformidade com a NBR 9778 (2005). A descrição das etapas dos procedimentos seguiu a mesma ordem de seqüência apresentada nos concretos CEL.

Na tabela 5.26, ilustram-se os resultados da absorção de água por imersão, porosidade total, índice de vazios e massas específicas para as formulações CELA. Os valores apresentados representam a média de três determinações com seus respectivos desvios padrões (expressos em %).

TABELA 5.26 – Propriedades físicas dos CELA, após 28 dias de cura, com os respectivos coeficientes de variação (em % entre parênteses).

CONCRETOS		CELA 00M-00C	CELA 05M-05C	CELA 10M-00C	CELA 00M-10C	CELA 00M-20C
PROPRIEDADES FÍSICAS	$Ab_{IMERSÃO}$ (%)	21,3 (± 1,7%)	11,5 (± 2,7%)	15,5 (± 0,9%)	13,1 (± 1,2%)	13,3 (± 1,3%)
	P_{TOTAL} (%)	22,9 (± 2,3%)	12,9 (± 6,6%)	19,7 (± 3,5%)	13,5 (± 1,3%)	12,6 (± 4,5%)
	I_v (%)	31,2 (± 2,2%)	20,8 (± 3,0%)	18,7 (± 1,2%)	21,4 (± 4,1%)	18,3 (± 2,8%)
	ME_{SECA} (kg/m ³)	1564 (± 0,5%)	1552 (± 0,7%)	1529 (± 0,3%)	1592 (± 2,1%)	1563 (± 1,7%)
	ME_{SAT} (kg/m ³)	1772 (± 0,8%)	1774 (± 0,8%)	1758 (± 0,6%)	1806 (± 1,6%)	1760 (± 1,8%)
	ME_{REAL} (kg/m ³)	1975 (± 1,2%)	1975 (± 1,1%)	2005 (± 0,7%)	2026 (± 1,8%)	1948 (± 1,6%)

Os concretos leves autoadensáveis apresentaram valores de massa específica real de 1948 kg/m³ a 2026 kg/m³. Comparando aos concretos autoadensáveis tradicionais, que usualmente, apresentam valores de massa específica próximos de 2600 kg/m³, os concretos estruturais leves autoadensáveis apresentaram redução dos valores da massa específica entre 22 % e 25%.

Com os resultados apresentados na tabela 5.26, foi construída a figura 5.24, onde se observa claramente que a inclusão das adições influencia positivamente, de forma indireta, na resistência dos concretos à penetração de agentes agressivos em situações submersas ou permanentemente saturadas e úmidas, através da redução dos parâmetros analisados (absorção por imersão, porosidade total e índice de vazios), quando comparados ao concreto sem adições (CELA 00M-00C).

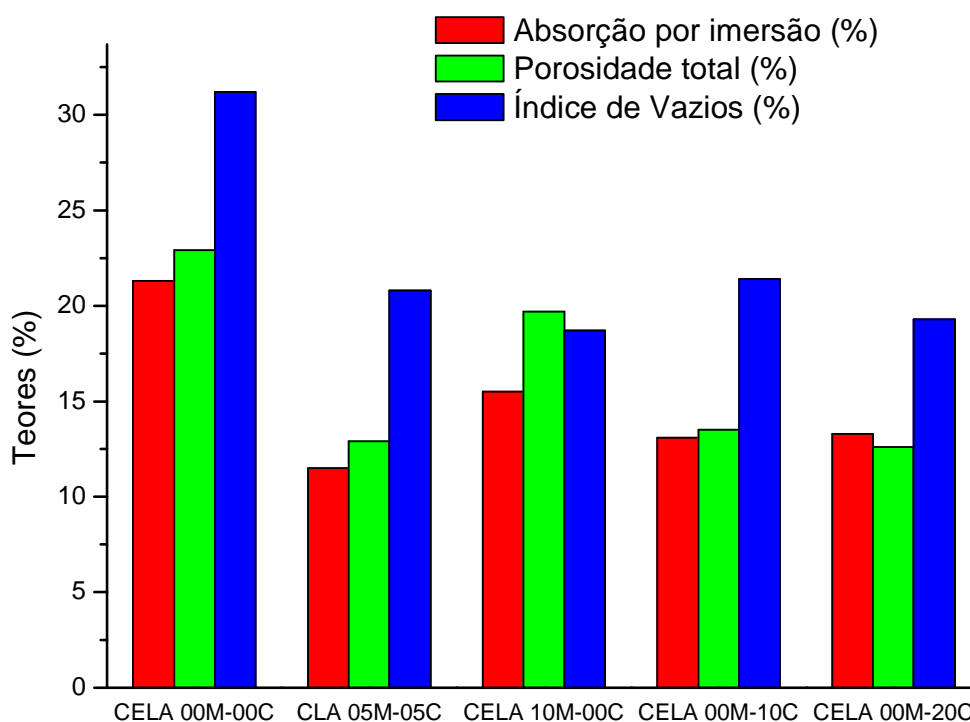


FIGURA 5.24 – Absorção por imersão, porosidade total e índice de vazios dos CELA, aos 28 dias.

A maior redução do teor de absorção por imersão ocorreu no CELA 05M-05C, com valor aproximado de 46%. A redução na porosidade total e índice de vazios foram observados para os concretos CELA 00M-10C e CELA 00M-20C, com valores cerca de 41% de redução.

5.3.2.2 Absorção por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade dos concretos estruturais leves autoadensáveis foi realizada segundo as recomendações da NBR 9779 (1995), após 28 dias de cura, e seguiu os mesmos procedimentos adotados para os concretos estruturais leves. Para tanto, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada dosagem e idade foram analisados três corpos-de-prova. Os resultados dessa análise experimental são apresentados na tabela 5.27 e figura 5.25.

TABELA 5.27 – Absorção de água por capilaridade dos CELA e ascensão capilar média após 72 h.

CONCRETOS	Absorção por capilaridade (g/cm ²)			Ascensão capilar média 72 h (cm)
	24h	48h	72h	
CELA 00M-00C	1,10 (± 0,9%)	1,21 (± 2,5%)	1,28 (± 3,9%)	16,5
CELA 05M-05C	1,10 (± 1,0%)	1,27 (± 0,6%)	1,37 (± 0,9%)	18,2
CELA 10M-00C	1,32 (± 3,0%)	1,51 (± 2,5%)	1,62 (± 1,7%)	15,5
CELA 00M-10C	0,89 (± 0,8%)	1,12 (± 0,4%)	1,19 (± 0,7%)	16,1
CELA 00M-20C	0,71 (± 2,5%)	0,99 (± 1,0%)	1,04 (± 0,3%)	14,2

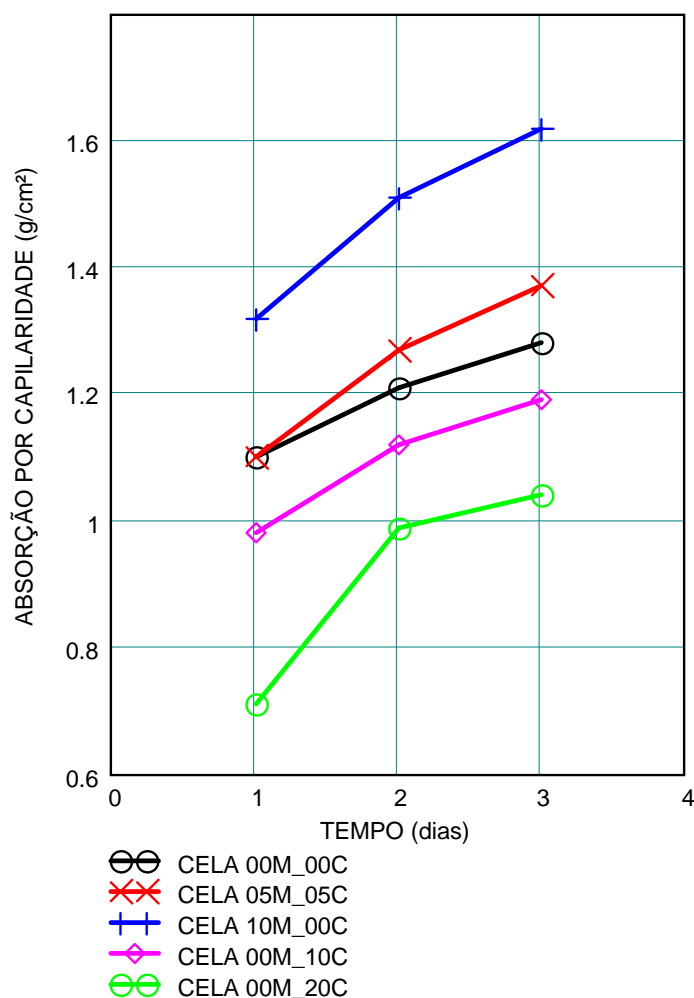


FIGURA 5.25 – Evolução da absorção de água por capilaridade dos CELA, aos 28 dias.

Analisando os resultados apresentados, observa-se que os concretos confeccionados somente com cinza de biomassa na sua composição, apresentaram valores de absorção de água por capilaridade e ascensão capilar significativamente inferior aos demais concretos. Este comportamento está associado ao possível refinamento de poros da matriz cimentícia com o uso de adições minerais, pois além de terem redução dos poros capilares (efeito filler), se apresentam menos intercomunicáveis, resultando em menor massa de água absorvida e redução da altura de ascensão capilar.

O concreto CELA 10M-00C foi o que apresentou maior absorção de água por capilaridade. O concreto que apresentou menor absorção de água por capilaridade e menor ascensão capilar foi o CELA 00M-20C.

Estes resultados, juntamente com os obtidos nos ensaios de absorção por imersão, porosidade total e índice de vazios, indicam que a inclusão da cinza de biomassa de cana-de-açúcar em substituição do cimento contribuiu, efetivamente, com a redução da permeabilidade dos concretos.

5.3.2.3 Resistência à compressão axial (f_c)

A evolução da resistência à compressão com relação ao tempo, dos concretos estruturais leves autoadensáveis CELA 00M-00C, CELA 05M-05C, CELA 10M-10C, CELA 00M-10C e CELA 00M-20C, estão apresentadas na tabela 5.28 e figura 5.26. Em cada idade, está apresentada a resistência média obtida através da realização de três amostras de resistência à compressão e o coeficiente de variação em percentagem.

TABELA 5.28 – Resistência à compressão axial (f_c) dos CELA, relações entre as resistências $f_{c, j\text{dias}}/f_{c, 28\text{dias}}$ e seus respectivos coeficientes de variação.

Resistência à compressão axial (MPa), coeficientes de variação, em %, e relações $f_{c, j\text{dias}}/f_{c, 28\text{dias}}$					
CELA	00M-00C	05M-05C	10M-00C	00M-10C	00M-20C
$f_{c, 1\text{dia}}$	8,9 ± (2,8%)	10,6 ± (1,7%)	12,4 ± (1,7%)	11,7 ± (6,8%)	10,7 ± (1,8%)
$f_{c, 1\text{dia}} / f_{c, 28\text{dias}}$	0,25	0,35	0,34	0,36	0,42
$f_{c, 7\text{dias}}$	27,5 ± (2,1%)	23,7 ± (2,3%)	27,3 ± (3,5%)	22,7 ± (5,1%)	24,6 ± (1,3%)
$f_{c, 7\text{dias}} / f_{c, 28\text{dias}}$	0,76	0,79	0,75	0,70	0,96
$f_{c, 28\text{dias}}$	36,0 ± (1,5%)	30,0 ± (4,9%)	36,3 ± (1,8%)	32,2 ± (2,8%)	25,6 ± (1,5%)
$f_{c, 91\text{dias}}$	38,2 ± (0,2%)	30,4 ± (4,2%)	37,4 ± (2,4%)	31,3 ± (2,0%)	36,6 ± (4,2%)
$f_{c, 91\text{dias}} / f_{c, 28\text{dias}}$	1,06	1,01	1,03	0,97	1,43

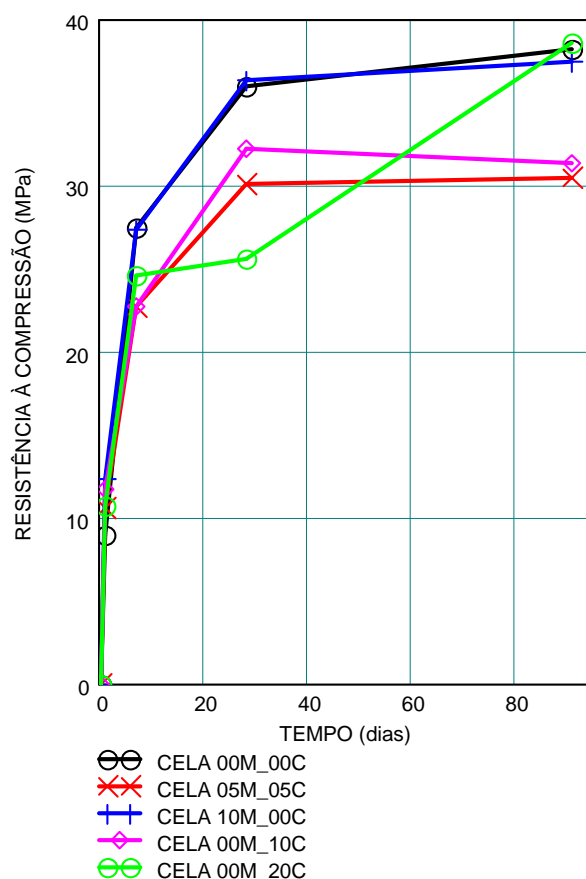


FIGURA 5.26 – Evolução da resistência à compressão dos concretos CELA.

Todos os concretos com adição mineral apresentaram resistência a 1 dia de idade superior ao concreto sem adição.

No entanto, para o tempo de cura de 7 e 28 dias, os concretos CELA 00M-00C e CELA 10M-00C foram os que apresentaram valores de resistência superiores aos demais concretos que continham cinza na sua composição. Pode-se atribuir este incremento de resistência do concreto CELA 00M-00C a menor relação a/c (tabela 4.15) que os demais concretos.

Como observado nos estudos de Massazza (2004) e Wild *et al.* (1996), credita-se o bom desempenho do CELA 10M-00C nas primeiras idades (1 e 7 dias) de hidratação do cimento, a elevada superfície específica do metacaulim, através do efeito filler, e em idades posteriores (28 e 91 dias), a reatividade pozolânica do metacaulim ocasionada pelos altos teores de sílica e alumina reativa.

Os concretos que continham cinza também tiveram contribuição desta adição mineral através do efeito filler, porém de forma menos pronunciada que o metacaulim, nas primeiras idades.

Com um tempo de cura maior, aos 91 dias, observa-se no CELA 00M-20C o avanço das reações de hidratação dos componentes do cimento e também do progresso das reações pozolânicas da cinza de forma mais evidente que as formulações CELA 05M-05C e CELA 00M-10C, uma vez que este concreto apresentou valor de resistência à compressão superior a resistência obtida aos 28 dias, de aproximadamente 43%.

O parágrafo acima se baseia na proposição de Goyal *et al.*, (2007), que associa o retardo na reação pozolânica, em compostos cimentícios com elevado teores de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, à redução da quantidade de hidróxido de cálcio (CH) à medida que se aumenta o tempo de cura.

Para Neville (2008), a principal reação pozolânica de formação do C-S-H, em cimento Portland pozolânico, deve-se ao consumo lento do hidróxido de cálcio em vez de produzi-lo, com um importante papel na durabilidade da pasta hidratada frente à ambientes ácidos, além da eficiência desta reação em preencher espaços capilares, melhorando, assim, a resistência e impermeabilidade do sistema.

5.3.2.4 Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)

Na tabela 5.29 apresentam-se os módulos de elasticidade dinâmico, em GPa, e as relações entre os módulos obtidos no dia do ensaio ($E_{d, j\text{dias}}$) e os módulos obtido aos 28 dias ($E_{d, 28\text{dias}}$).

TABELA 5.29 – Módulos de elasticidade dinâmico e relações entre os módulos $E_{d, j\text{dias}}/E_{d, 28\text{dias}}$.

Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d), em GPa					
DOSAGENS	00M-00C	05M-05C	10M-00C	00M-10C	00M-20C
$E_{d, 1\text{dia}}$	15,04	12,93	12,58	7,78	15,47
$E_{d, 1\text{dia}} / E_{d, 28\text{dias}}$	0,70	0,59	0,59	0,42	0,80
$E_{d, 7\text{dias}}$	20,08	20,32	20,86	14,84	19,69
$E_{d, 7\text{dias}} / E_{d, 28\text{dias}}$	0,94	0,93	0,98	0,81	1,02
$E_{d, 28\text{dias}}$	21,45	21,88	21,25	18,42	19,29
$E_{d, 91\text{dias}}$	21,81	23,09	20,96	20,83	19,95
$E_{d, 91\text{dias}} / E_{d, 28\text{ dias}}$	1,02	1,06	0,99	1,13	1,03

Na figura 5.27, ilustra-se a evolução dos módulos de elasticidade dinâmico dos concretos estruturais leves autoadensáveis.

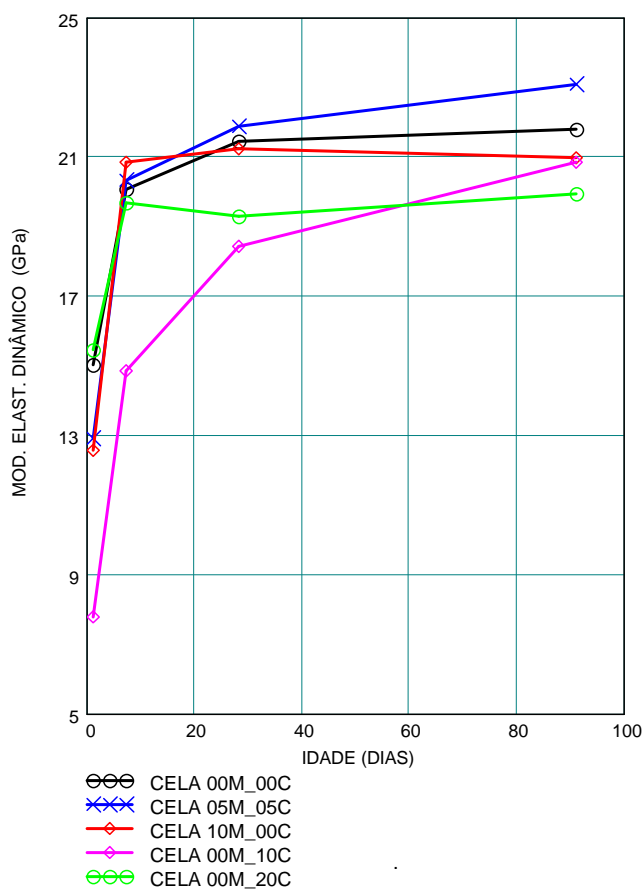


FIGURA 5.27 – Módulos de elasticidade dinâmico, em função da idade, dos CELA.

Todas as dosagens apresentaram acréscimo nos módulos com a evolução da idade. Os módulos de elasticidade dinâmico da dosagem CELA 00M-10C foram os que apresentaram menores valores, em todas as idades, com relação ao concreto de referência (CELA 00M-00C);

Aos 28 dias os concretos variaram os módulos entre 18 MPa e 21 MPa, aproximadamente. Estes valores representam uma diferença insignificante, quantitativamente, em se tratando de módulos de elasticidade.

Aos 91 dias os módulos mantiveram-se praticamente constantes aos obtidos aos 28 dias, com exceção para as dosagens CELA 05M-05C e CELA 00M-10C, que obtiveram um pequeno acréscimo de 6% e 13%, respectivamente.

Estes resultados indicam que, para as dosagens estudadas, a adição de metacaulim e cinza de biomassa contribuíram para a manutenção da rigidez dos concretos, associando o efeito filler, através do preenchimento dos poros intersticiais de maiores dimensões, e da comprovada atividade pozolânica do metacaulim, com a transformação do gel amorfo de tobermorita em C-S-H adicional. Estes resultados corroboram com os resultados apresentados de resistência à compressão axial.

5.3.3 Propriedades de durabilidade

5.3.3.1 *Permeabilidade a gás nitrogênio*

Nesta etapa, a análise do coeficiente de permeabilidade dos concretos estruturais leves autoadensáveis (CELA) obedeceu aos mesmos procedimentos de moldagem, cura, secagem e metodologia de realização do ensaio das amostras cilíndricas (38 mm de diâmetro e 76 mm de altura) realizadas com os concretos estruturais leves (CEL).

Os valores obtidos de permeabilidade nos ensaios das amostras, em mD (mildarcy) também foram transformados para a unidade de m^2 , de modo a facilitar sua interpretação com os valores prescritos pela literatura técnica.

Na tabela 5.30 apresentam-se os valores obtidos em duas amostras para cada concreto, aos 28 dias, e a média aritmética com seus respectivos coeficientes de variação em porcentagem.

TABELA 5.30 – Valores de coeficientes de permeabilidade a gás nitrogênio, em m^2 , observados nos CELA

CONCRETO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE k (m^2)		
	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	Média
CELA 00M-00C	$1,21 \times 10^{-16}$	$1,26 \times 10^{-16}$	$1,24 \times 10^{-16}$ ($\pm 7,8\%$)
CELA 05M-05C	$0,49 \times 10^{-16}$	$0,53 \times 10^{-16}$	$0,51 \times 10^{-16}$ ($\pm 2,9\%$)
CELA 10M-00C	$0,28 \times 10^{-16}$	$0,39 \times 10^{-16}$	$0,34 \times 10^{-16}$ ($\pm 7,8\%$)
CELA 00M-10C	$0,71 \times 10^{-16}$	$0,97 \times 10^{-16}$	$0,84 \times 10^{-16}$ ($\pm 7,8\%$)
CELA 00M-20C	$0,27 \times 10^{-16}$	$0,31 \times 10^{-16}$	$0,29 \times 10^{-16}$ ($\pm 7,8\%$)

Com base nos resultados apresentados, todos os concretos com adições minerais na sua composição obtiveram valores de permeabilidade abaixo do concreto sem nenhum tipo de adição e próximos aos especificados por Ben-Othman e Buenfeld (1990), sugerindo uma diminuição de poros comunicantes na sua estrutura interna, corroborando com os valores obtidos nos ensaios de porosidade total e absorção de água por capilaridade.

Analisando-se ainda a tabela acima, o concreto que apresentou menor coeficiente de permeabilidade foi o CELA 00M-20C e o que apresentou maior coeficiente de permeabilidade foi o concreto sem nenhum tipo de adição mineral na sua composição (CELA 00M-00C).

A redução do coeficiente de permeabilidade a gás do concreto CELA 00M-20C, em relação ao concreto CELA 00M-00C, foi bastante significativa, ficando próximo de 76%.

5.3.4 Características microestruturais

As amostras dos concretos ensaiados foram caracterizadas por técnicas de: Análise Química por Fluorescência de raios X (FRX); Análise Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) e Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

5.3.4.1 Fluorescência (FRX)

Os concretos apresentaram como principais constituintes básicos, os óxidos CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, K₂O, SO₃ e TiO₂. O percentual mássico destes óxidos é apresentado na tabela 5.31. Analisando-se os resultados apresentados nesta tabela, percebe-se uma redução do teor de CaO, de forma mais acentuada, para o concreto que teve uma maior quantidade de cinza de biomassa em substituição do cimento (CELA 00M-20C) e em contrapartida, maiores concentrações de SiO₂. Esta tendência de redução da portlandita associada à redução de CaO não pode ser atribuído apenas a este fenômeno, uma vez que a matriz de C-S-H também tem cálcio na sua composição. Assim, os dados apresentados servem apenas para análise semi-quantitativa.

TABELA 5.31 – Principais elementos observados nos concretos CELA

COMPOSTOS	Dosagens				
	CELA 00M-00C	CELA 05M-05C	CELA 10M-00C	CELA 00M-10C	CELA 00M-20C
CaO	53,349	41,737	49,761	47,693	35,007
SiO ₂	23,970	25,960	25,606	27,912	30,973
Fe ₂ O ₃	13,278	12,104	14,541	15,260	14,536
Al ₂ O ₃	-	8,986	-	-	9,863
K ₂ O	3,925	4,022	4,168	4,404	5,152
SO ₃	3,102	4,984	2,924	2,243	1,874
TiO ₂	1,231	1,196	1,479	1,456	1,371

5.3.4.2 Difração de raios X (DRX)

Os resultados obtidos nas análises de DRX dos concretos CELA, para período de cura de 28 dias, são apresentados nas figuras 5.28 a 5.32, com as fases já identificadas.

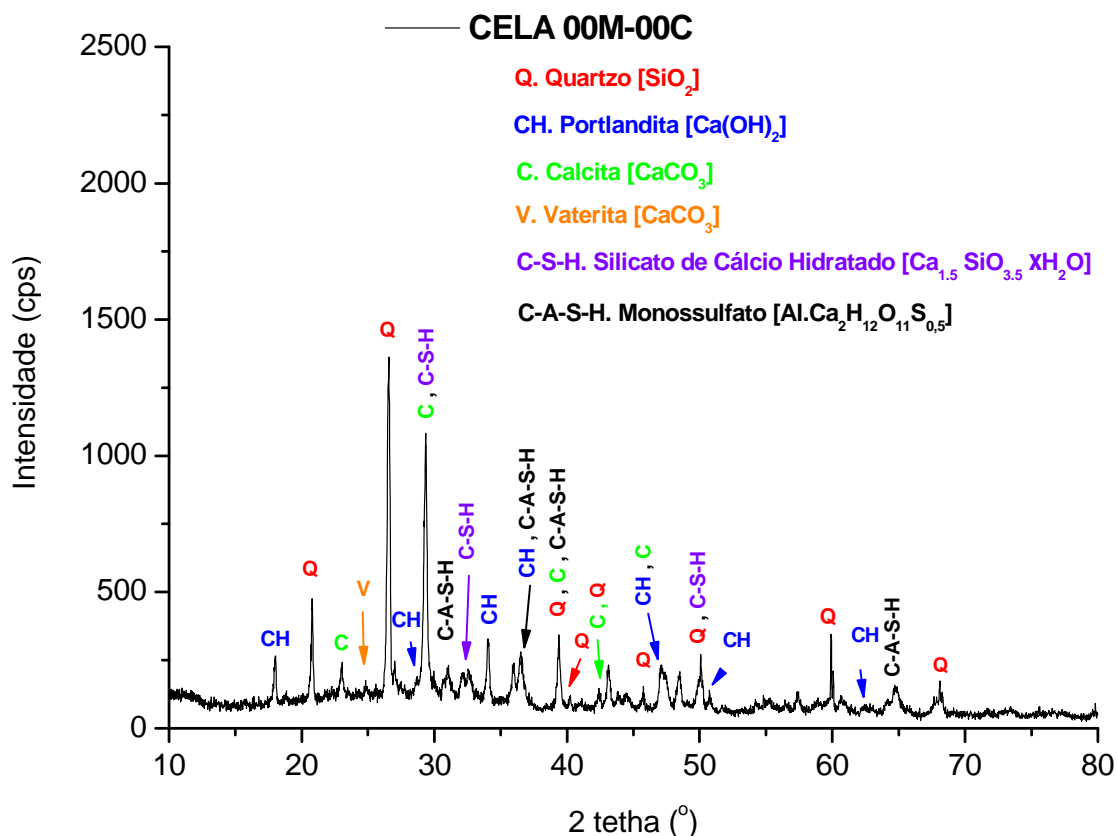


FIGURA 5.28 – Difratoograma de raios X do concreto CELA 00M-00C.

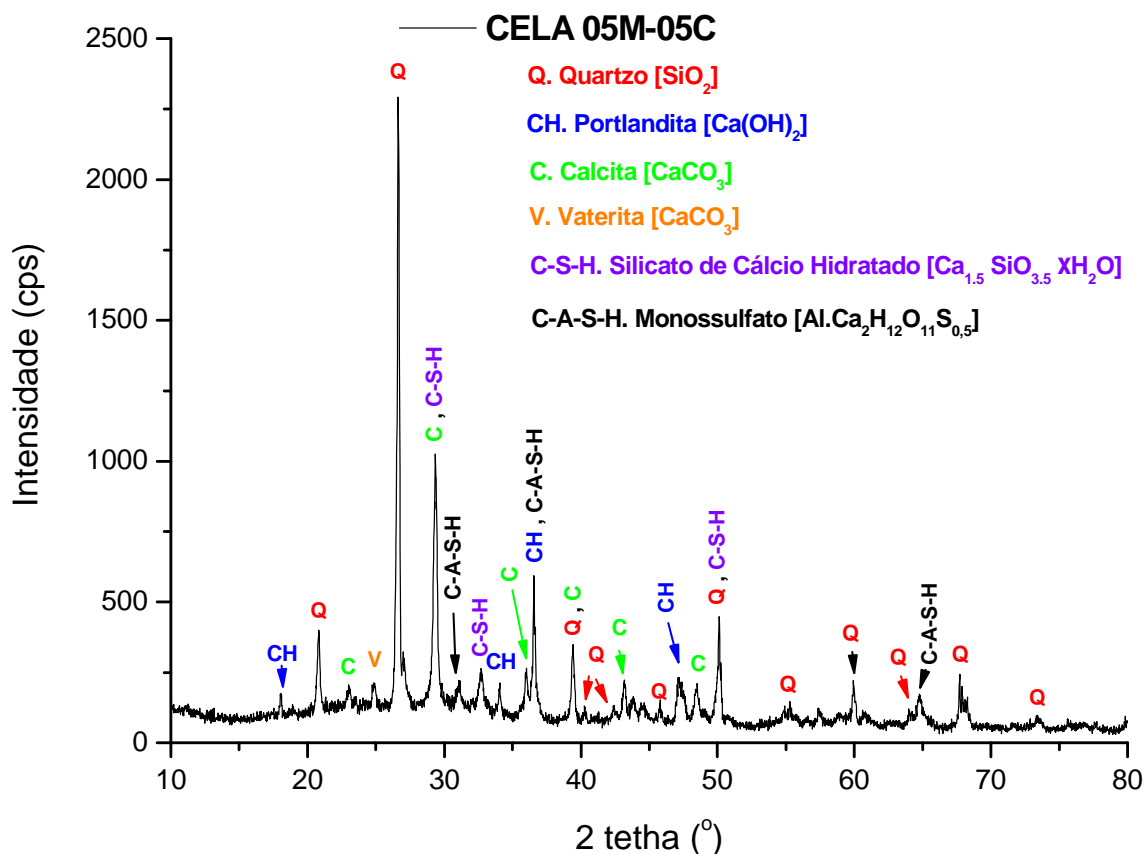


FIGURA 5.29 – Difratoograma de raios X do concreto CELA 05M-05C.

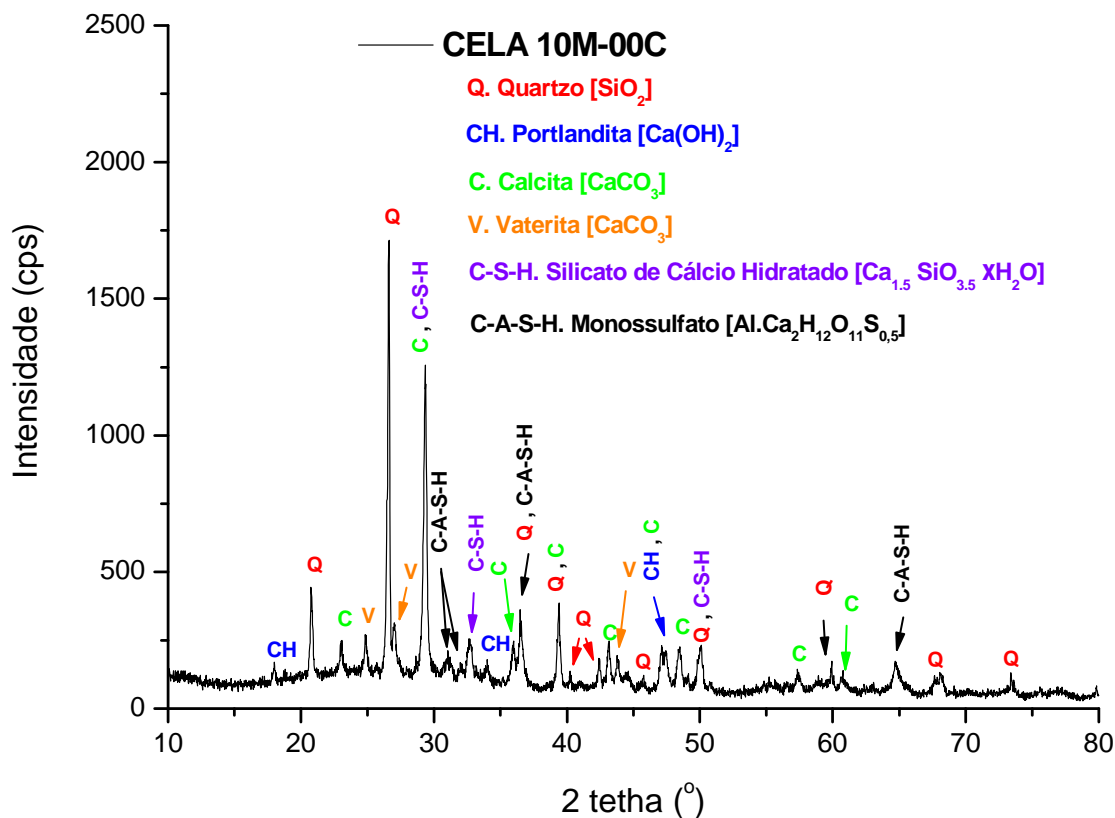


FIGURA 5.30 – Difratoograma de raios X do concreto CELA 10M-00C.

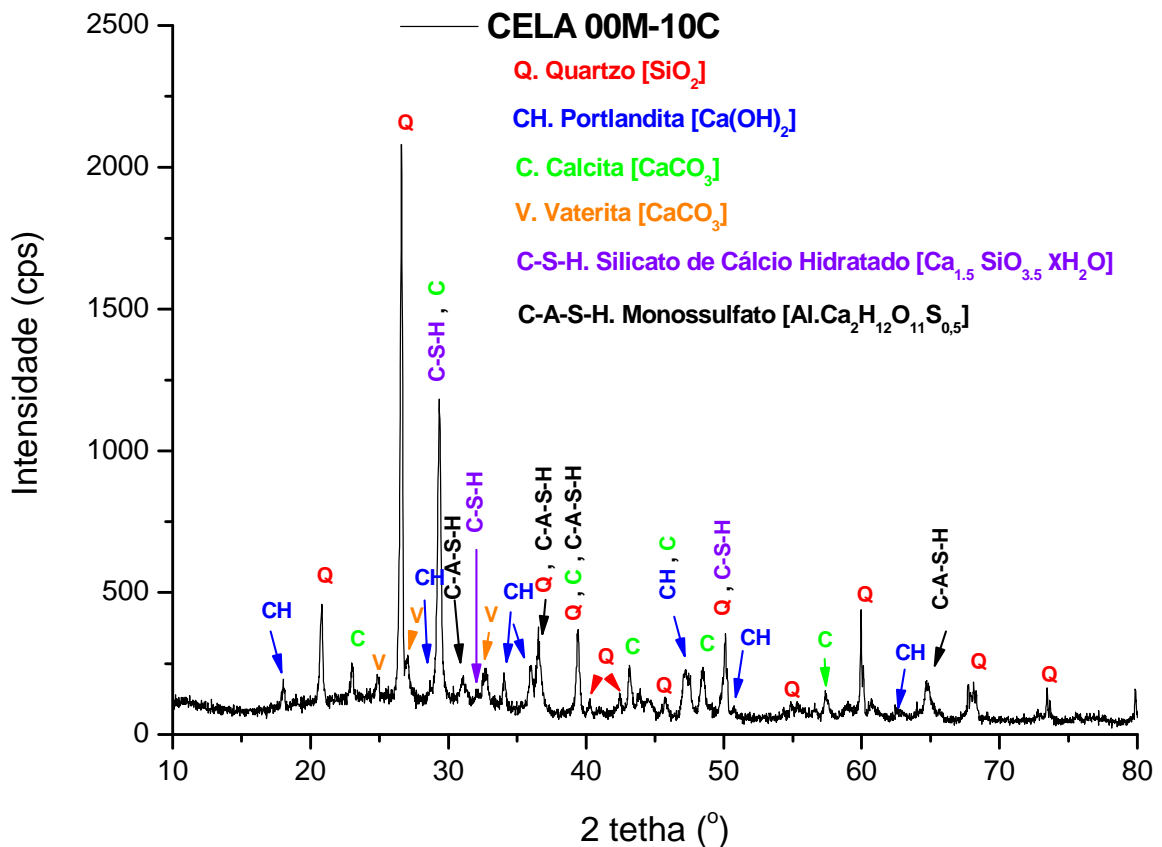


FIGURA 5.31 – Difratoograma de raios X do concreto CELA 00M-10C.

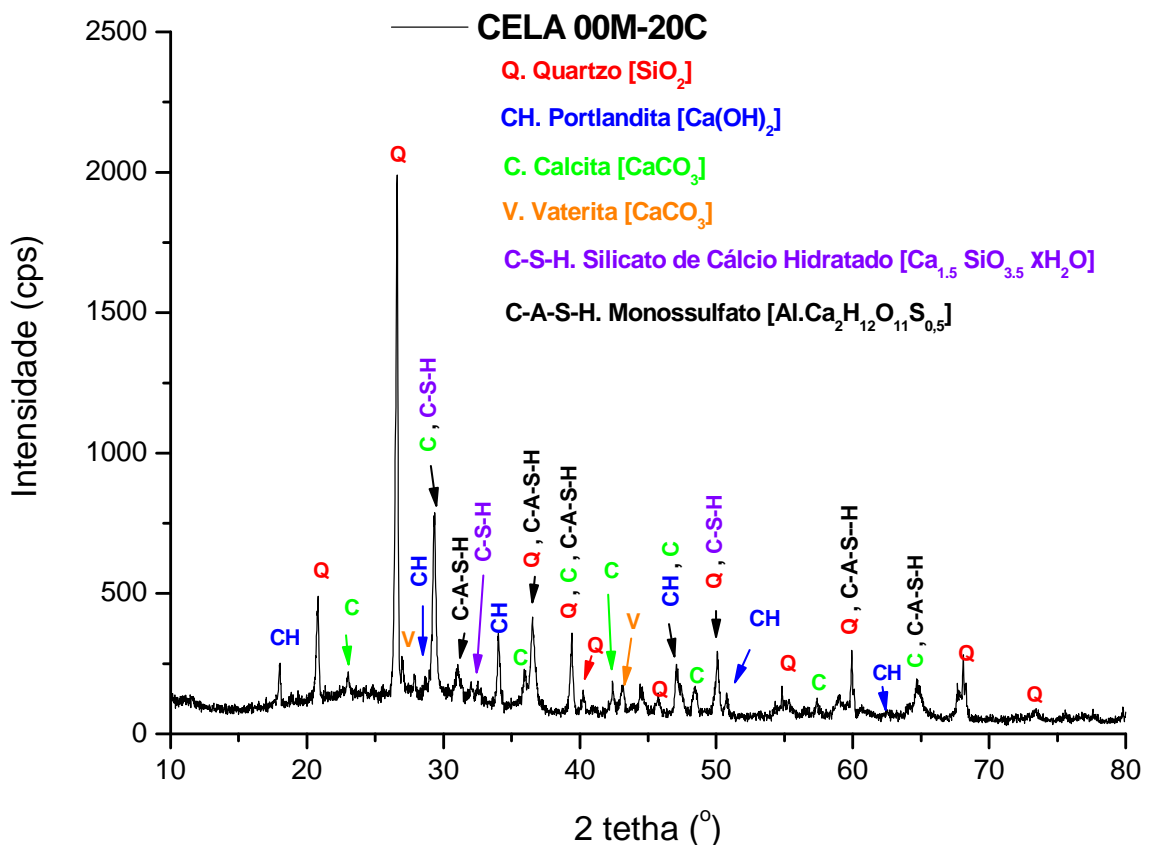


FIGURA 5.32 – Difratoograma de raios X do concreto CELA 00M-20C.

Os picos referentes à identificação de quartzo ($2\theta = 26,8^\circ$), observados em todas as amostras, deve-se a presença da areia nas amostras analisadas.

Nas análises de DRX não foram identificadas concentração de etringita, provavelmente pela baixa concentração deste composto nas matrizes cimentícias, ou por se apresentarem em ângulos 2θ inferiores ao analisado, ou seja, menor que 10° .

O pico identificado no ensaio de DRX que apresenta apenas a substância de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ocorreu no ângulo 2θ de $32,06^\circ$, em todos os CELA. A intensidade desses picos, para todos os CELA, está ilustrada na figura 5.33. Para a substância de hidróxido de cálcio (CH), os principais picos presentes nos CELA, aos 28 dias de cura, estão ilustrados na figura 5.34.

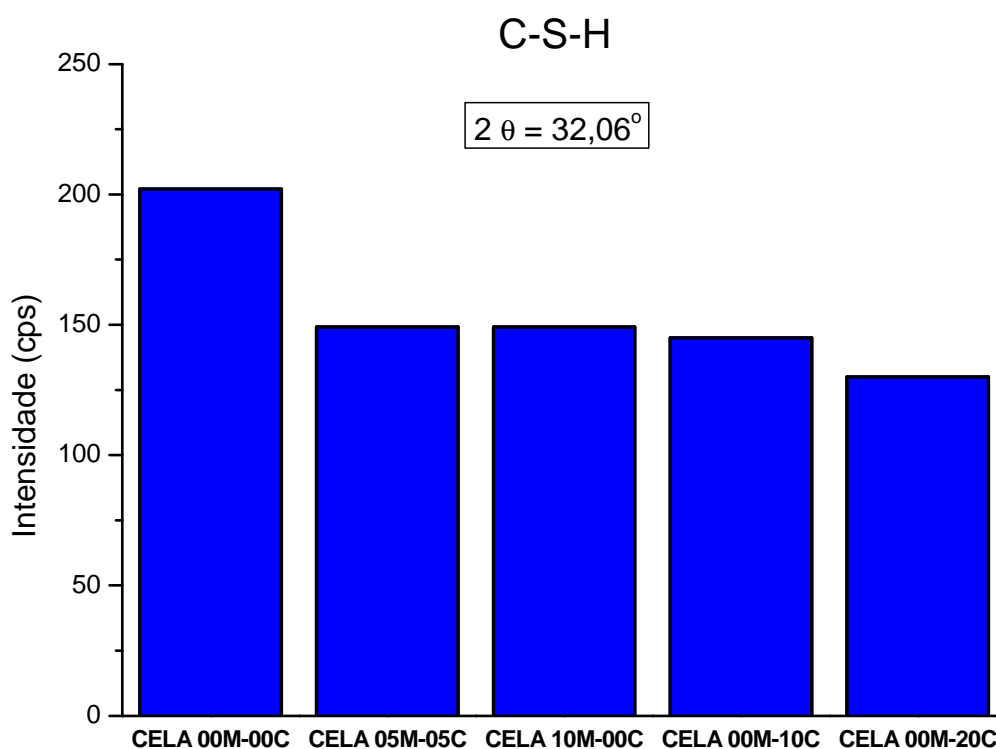


FIGURA 5.33 – Intensidade dos picos de C-S-H ângulo $2\theta = 32,06^\circ$, de C-S-H, dos CELA, aos 28 dias.

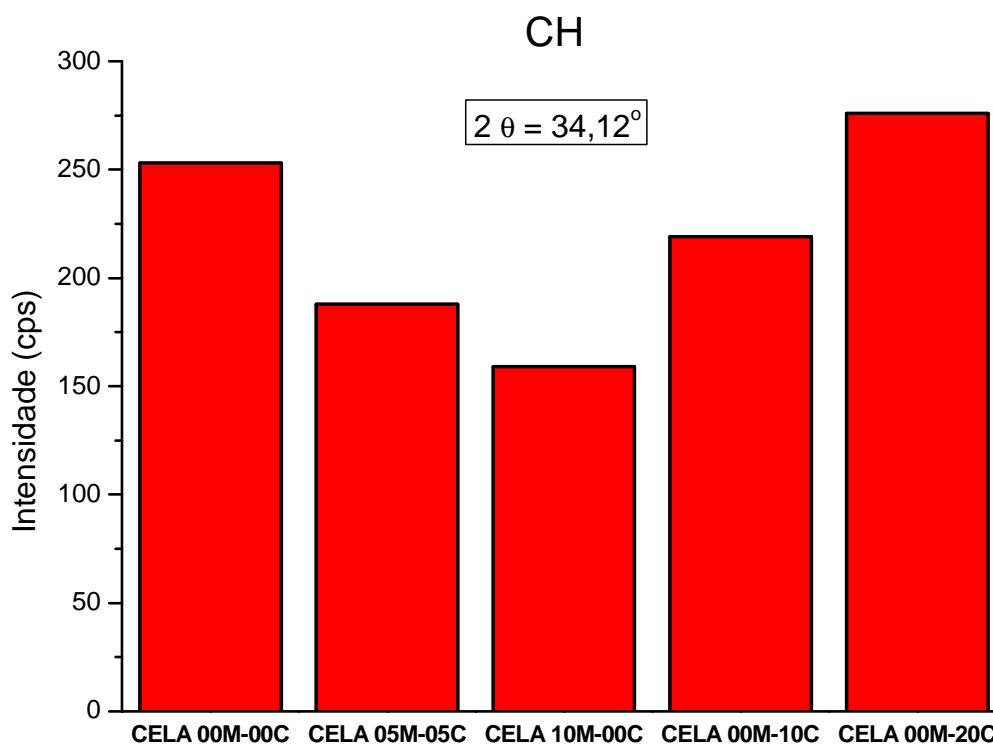


FIGURA 5.34 – Intensidade dos picos de CH ângulo $2\theta = 34,12^\circ$ dos CELA, aos 28 dias.

Considerando as figuras 5.33 e 5.34, nota-se que a mistura CELA 00M-20C é a que apresenta menor intensidade de C-S-H e maior intensidade de CH do que as demais formulações. Diante desta constatação, pode-se sugerir que, para este período de cura (28 dias), o efeito pozolânico ainda não foi totalmente efetivado, contribuindo apenas no refinamento dos poros (efeito filler). Porém, analisando-se os resultados de resistência à compressão (tabela 5.28 e figura 5.26), verifica-se, que a reatividade pozolânica foi completada aos 91 dias de idade, comprovada pelo aumento da resistência do concreto CELA 00M-20C neste período de cura.

Quando se compara as demais formulações com adições minerais (CELA 05M-05C, 10M-00C E 00M-10C) com o CELA 00M-00C, com relação a presença do CH, percebe-se menor incidência desta substância. Para a mistura CELA 10M-00C, este fato pode ser explicado pela comprovada reatividade do metacaulim, que reage com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado (adicional), que é o principal responsável pela resistência e rigidez de compostos de cimento hidratado (DAL MOLIN, 2005; BENTZ e GARBOCZI, 1992).

Já para os concretos CELA 05M-05C e CELA 00M-10C, este fenômeno de reação pozolânica foi menos efetivo do que o CELA 10M-00C, porém mais pronunciado do que o CELA 00M-20C, inferindo-se que a presença da cinza, para as quantidades utilizadas de 5% e 10% na mistura, também reagiu com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, produzindo C-S-H adicional.

De modo geral, pode-se deduzir que as adições minerais contribuíram para a melhoria do sistema através do preenchimento dos espaços capilares, reduzindo significativamente a permeabilidade, além da manutenção da resistência dos concretos. Estes resultados são corroborados pelos dados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade e permeabilidade a gás nitrogênio, apresentados na figura 5.25 e tabela 5.30, respectivamente.

5.3.4.3 Micrografia eletrônica por varredura (MEV)

Em complementação às análises de difração de raios x, buscou-se realizar análises de microscopia eletrônica para averiguar eventuais transformações e modificações microestruturais da argamassa cimentícia dos concretos e sua morfologia, provocada pela reação de hidratação do cimento e adição da cinza de biomassa e do metacaulim, bem como parâmetros que pudessem auxiliar na identificação da redução ou aumento da porosidade. Com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, teve-se também a execução da micro-análise por espectrometria de energia dispersiva (EDS) objetivando verificar os elementos químicos presentes nos locais onde se observaram compostos com morfologias semelhantes às descritas na literatura com características dos produtos de hidratação do cimento. Os principais elementos químicos identificados, através da análise por EDS, foram Ca, Si, Al, Mg, Fe e C.

Na figura 5.35 mostra-se a morfologia do concreto CELA 00M-00C. Pode-se observar a aparência vítrea e contínua da matriz, interrompida apenas pela presença de cristais hexagonais de hidróxido de cálcio.

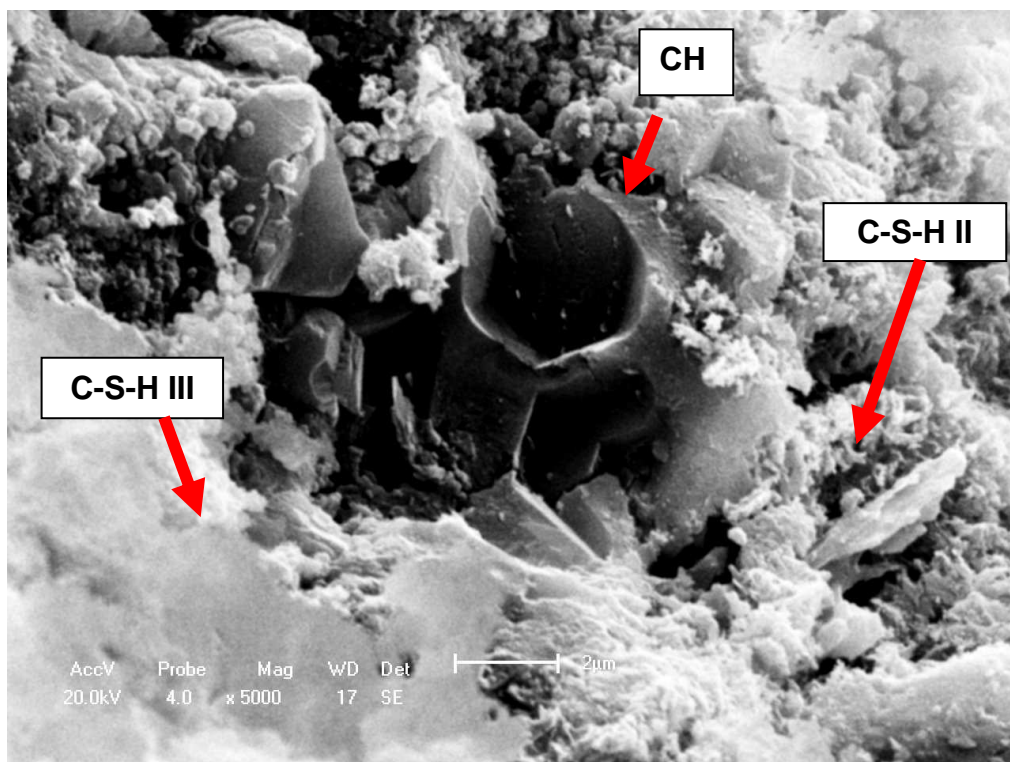


FIGURA 5.35 – Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 00M-00C.

Existem, basicamente, quatro tipos de morfologias do C-S-H, variando de reticulado cristalino a uma massa compacta e homogênea sem forma definida (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Analisando-se a figura acima conjuntamente com a análise pontual (EDS), pode-se afirmar que o C-S-H identificado nesta amostra é do tipo II e III. O tipo II apresenta-se em forma de reticulado cristalino, também denominado favo de mel, e o tipo III, em forma de uma massa compacta e homogênea, com estrutura difícil de ser descrita.

A figura 5.36 mostra a morfologia do concreto com adição de metacaulim e cinza de biomassa (CELA 05M-05C). Nesta imagem visualiza-se o contorno do agregado aderido pela fase de C-S-H e pequenas partículas de metacaulim não reagido, identificado pela alta concentração de Si e Al. Verifica-se, ainda, nesta figura, a presença de fissura entre a zona de transição e a matriz cimentícia.

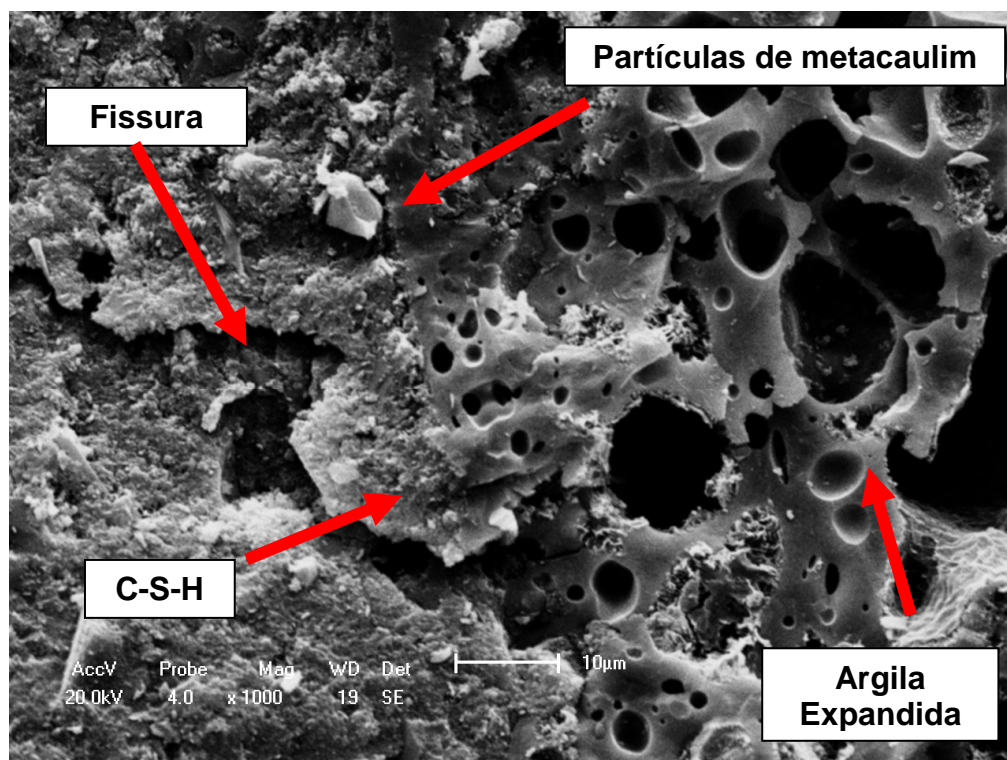


FIGURA 5.36 – Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 05M-05C.

A figura 5.37 mostra a estrutura morfológica observada no concreto CELA 10M-00C.

Os resultados de resistência à compressão, índice de vazios e massa específica real corroboram com a indicação de uma matriz de C-S-H mais compacta, com fibras mais próximas, adicionando-se a este comportamento os grandes cristais hexagonais de portlandita acima identificados. Induz-se também ao conceito de que as fases de C-S-H, proveniente da atividade pozolânica desta adição (metacaulim) são mais cristalinos nesta fase do que no gel amorfo e, conseqüentemente, contribuem para o aumento na resistência e rigidez dos concretos, principalmente aos curados aos 91 dias de idade, com todas as sinergias de hidratação já efetivadas.

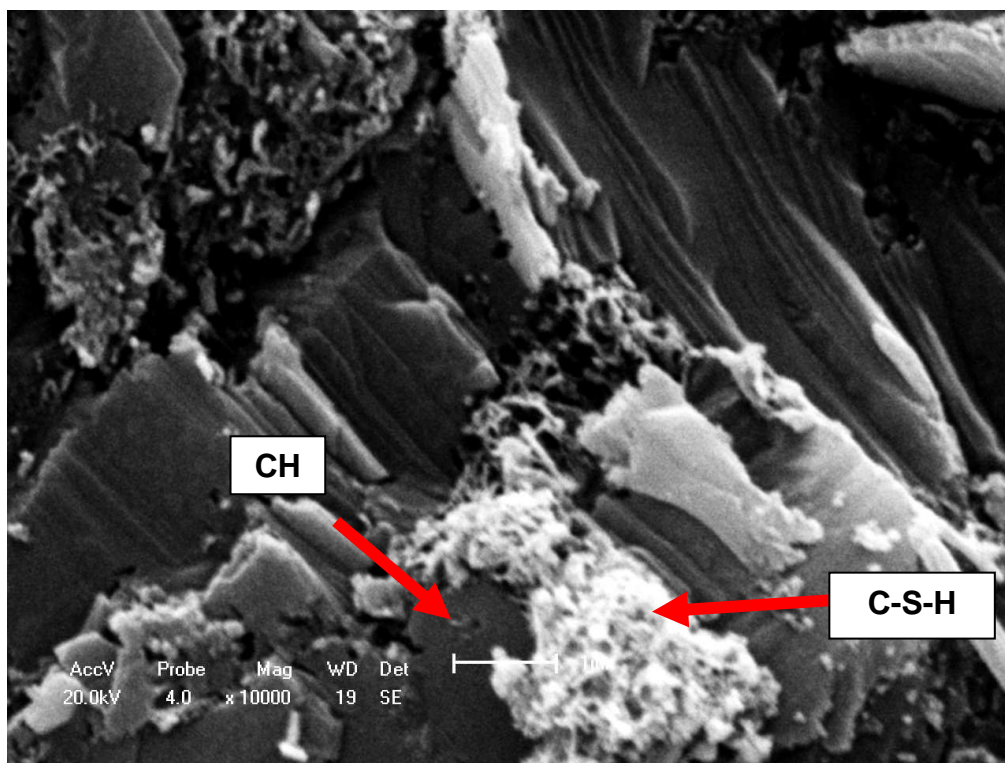


FIGURA 5.37 – Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 10M-00C.

Na figura 5.38, ilustra-se a morfologia do concreto CELA 00M-10C, com destaque para fissura entre zona de transição e a matriz cimentícia. Nesta imagem observa-se, também, tanto a zona de transição e a matriz cimentícia apresentam-se de forma coesa e compacta. Percebe-se ainda a presença de C-S-H no interior dos poros do agregado, sugerindo reações pozolânicas da cinza de biomassa nesta mistura.

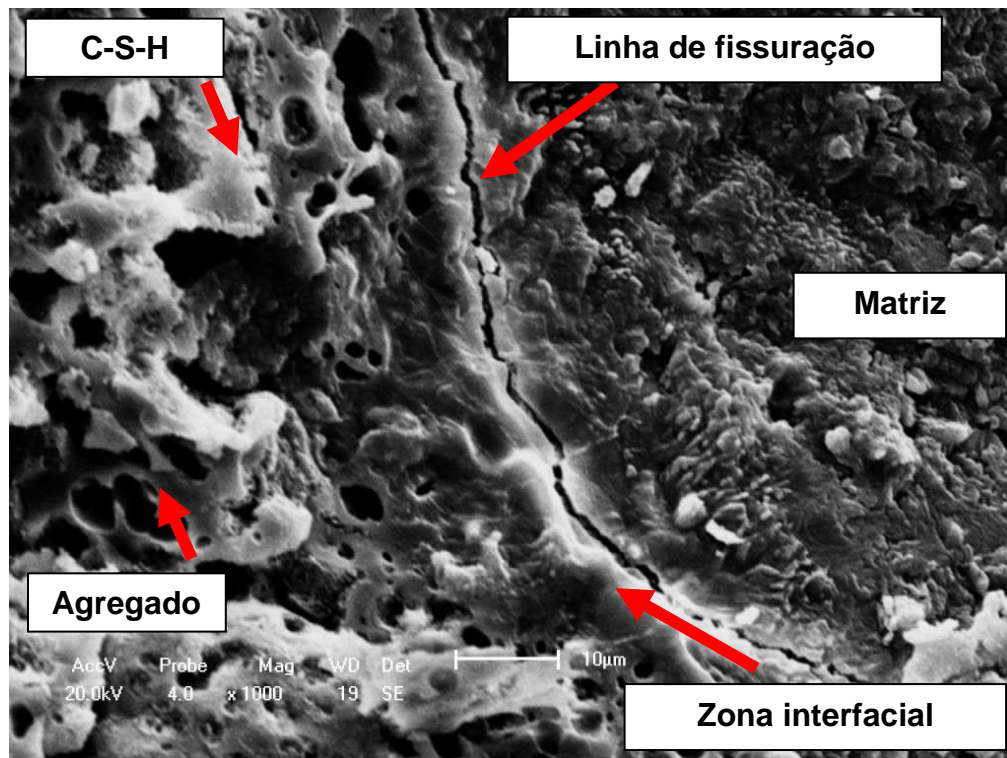


FIGURA 5.38 – Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 00M-10C.

A imagem, representada na figura 5.39, associada à análise pontual por EDS, demonstra resíduos de cinza de biomassa que não reagiram, aos 28 dias de cura, com os produtos de hidratação do cimento do concreto CELA 00M-20C. A presença da matéria prima não reagida pode estar associada à baixa reatividade desta substância. Salienta-se que somente neste composto é que foi observada a presença deste material, ou seja, para a mistura com 20% de cinza na sua composição. Sendo assim, seria recomendável fazer estudos mais acurados, para este tipo de análise, aos 91 dias de idade, uma vez que, neste composto, a resistência à compressão teve um aumento de 43% ao observado nas amostras ensaiadas aos 28 dias.



FIGURA 5.39 – Micrografia eletrônica por varredura do concreto CELA 00M-20C.

5.3.4.4 Zona de transição

A microestrutura do concreto estrutural leve autoadensável está demonstrada nas figuras 5.40 e 5.41.

Nestas imagens visualiza-se a penetração (entrelaçamento) da argamassa cimentícia (fig. 5.40) com a superfície do agregado leve e a presença dos produtos de hidratação (fig. 5.41) dentro dos poros do agregado.

Como relatam Lo *et al.* (2007), esse fenômeno de entrelaçamento entre o agregado leve e a matriz é responsável pelo desenvolvimento da alta resistência mecânica em concretos leves.

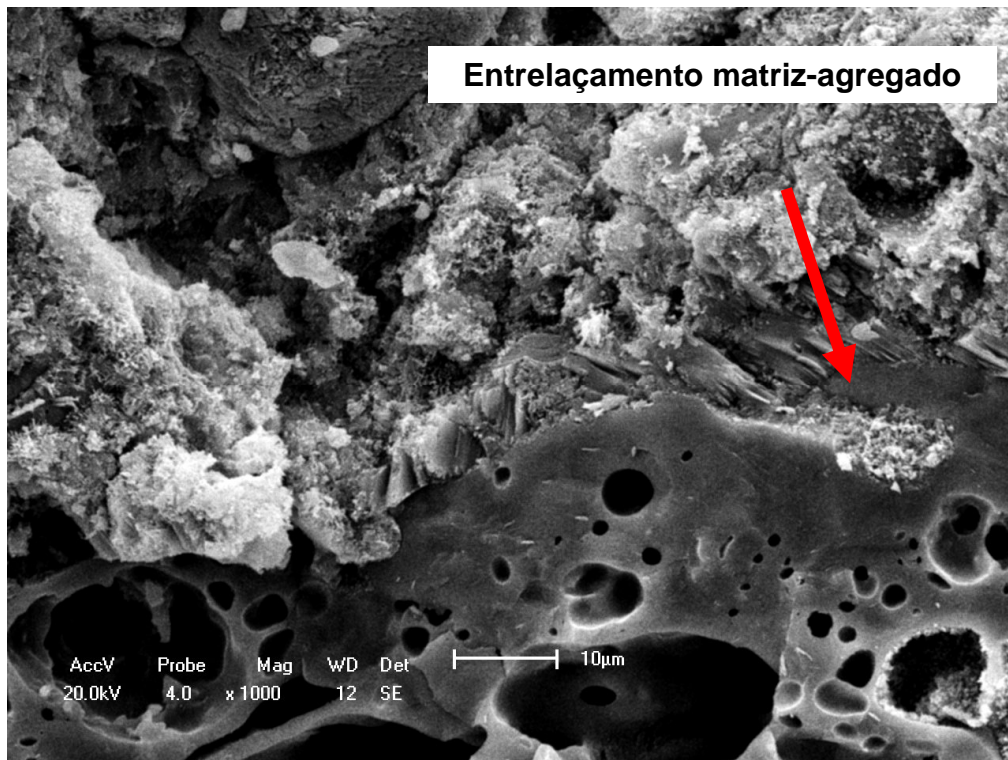


FIGURA 5.40 – Micrografia ilustrando o entrelaçamento entre a argamassa cimentícia e o agregado leve.

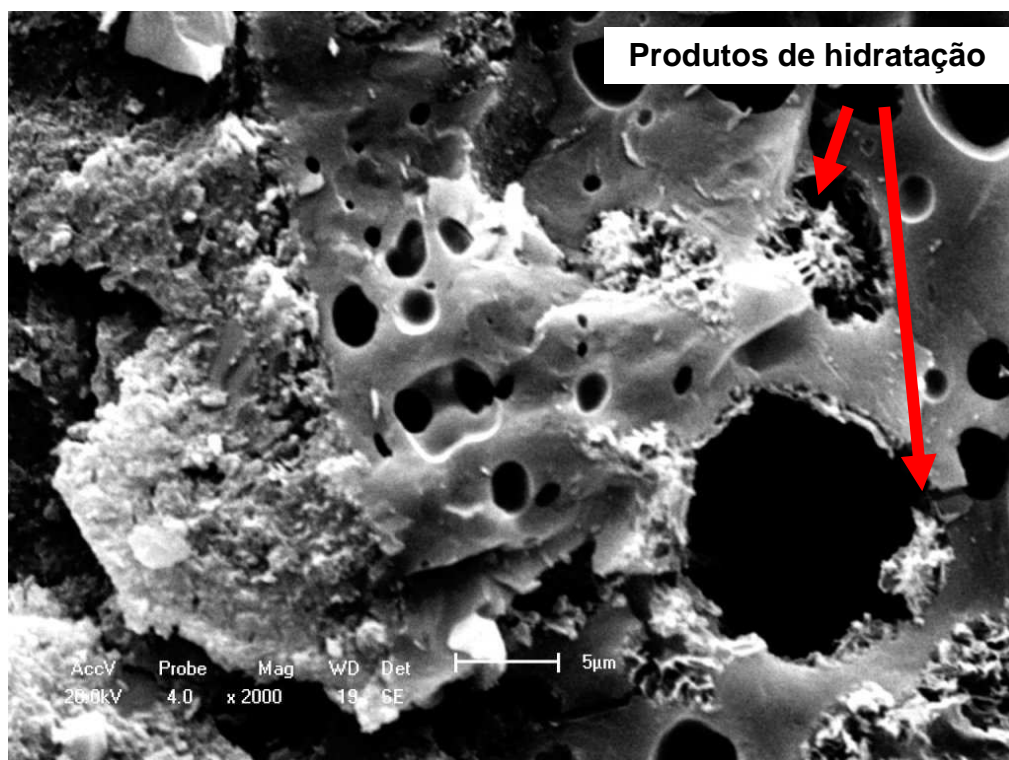


FIGURA 5.41 – Ilustração dos produtos de hidratação da matriz cimentícia internamente nos poros do agregado leve.

Para Zhang e Gjrv (1990), a ausência do “efeito parede” e o entrelaçamento agregado-matriz cimentícia, no contorno da zona de interface, melhora a integridade do concreto leve, ocasionando a uma alta resistência inicial do concreto em aproximadamente 91% nos primeiros setes dias de idade. Este dado corrobora com o resultado do concreto CELA 00M-20C apresentado na tabela 5.28, que atingiu, aos 91 dias de idade, 96% da resistência obtida aos 28 dias. Contudo, os demais concretos apresentaram uma resistência de aproximadamente 70% da resistência máxima aos 28 dias. Este valor é geralmente observado em concretos convencionais.

Na figura 5.42, visualiza-se, em micrografia de menor magnitude, o contorno (linhas brancas) da zona de transição entre o agregado leve e a matriz cimentícia. Apesar do contorno não ter espessura bem definida, percebe-se uma interconectividade eficiente e contínua ao longo da superfície do agregado. Este fato foi observado em todas as amostras analisadas.

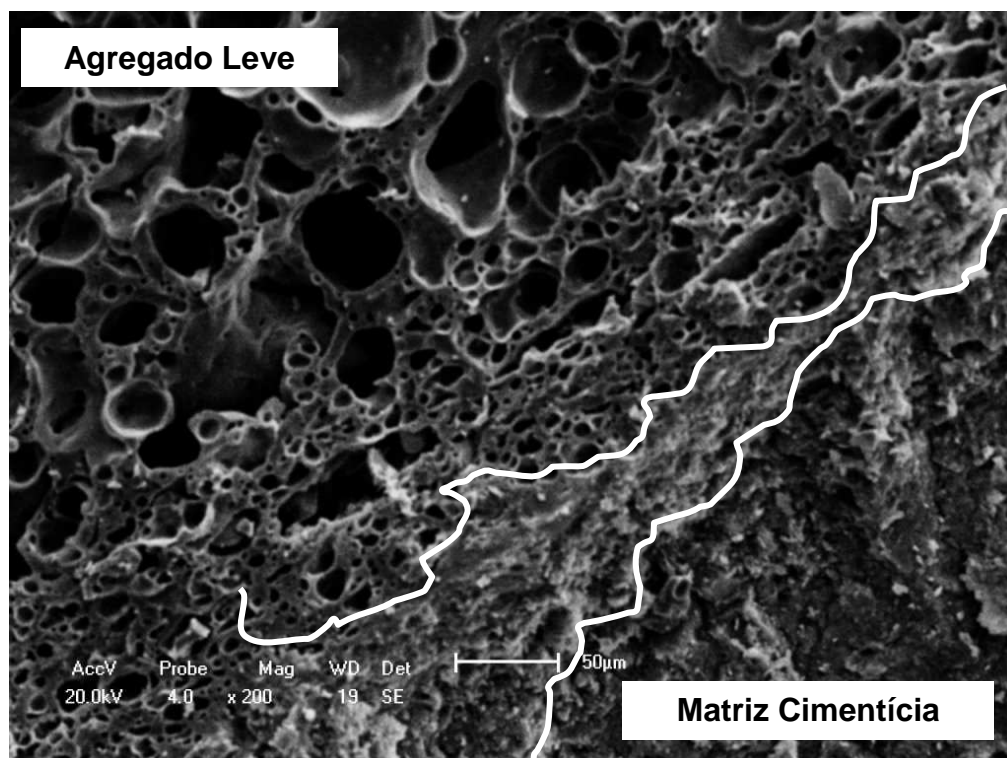


FIGURA 5.42 – Visualização do contorno da zona de transição matriz-agregado.

Os vazios capilares, identificados pelas setas nas figuras 5.43 e 5.44, não se apresentaram de maneira uniforme, ou seja, sem valores de diâmetros definidos. Scrivener e Gartner (1998), sugerem que os vazios capilares presentes na matriz cimentícia têm aproximadamente 10 nm a 50 nm de diâmetro, podendo atingir de 3 μm a 5 μm quando a relação água-cimento é alta.

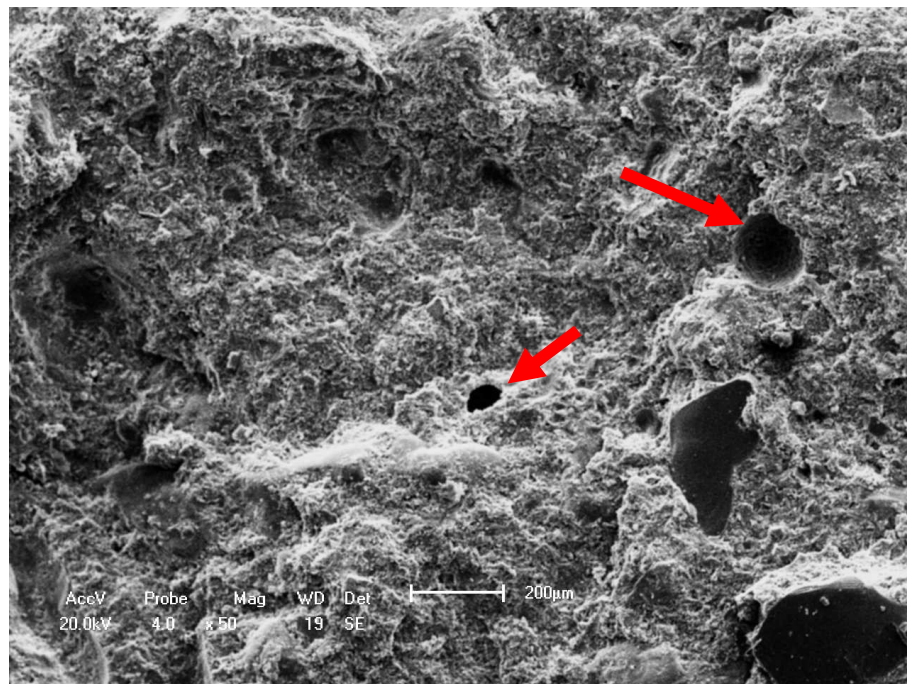


FIGURA 5.43 – Micrografia ilustrando os vazios capilares na zona de transição (CELA 10M-00C).

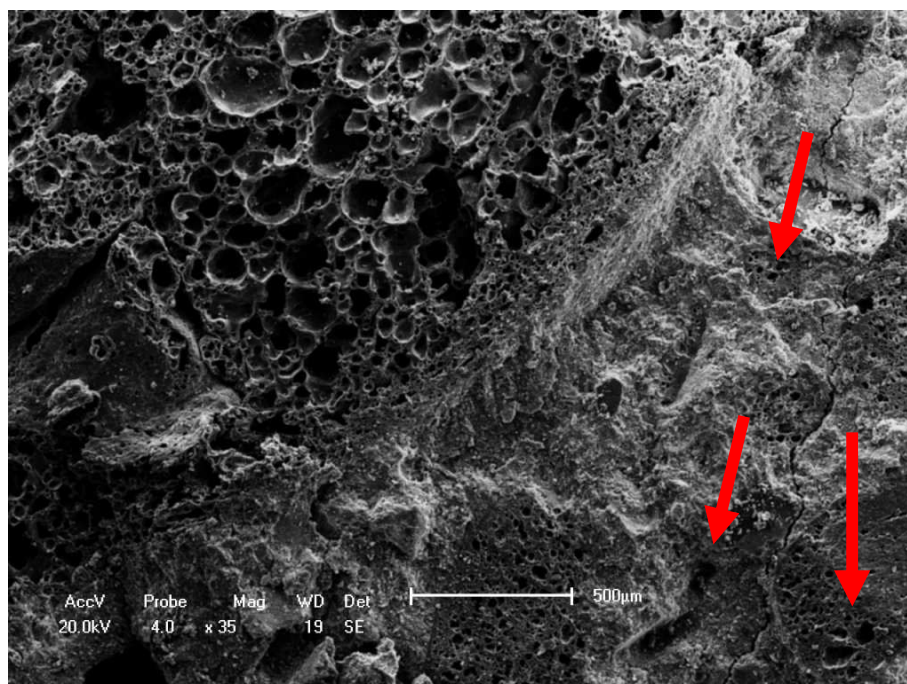


FIGURA 5.44 – Micrografia ilustrando os vazios capilares na zona de transição (CELA 10M-20C).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo sobre concreto estrutural leve (CEL) e concreto estrutural leve autoadensável (CELA), com características e propriedades distintas em função dos seus elementos constituintes.

Assim sendo, as conclusões aqui apresentadas trata exclusivamente da influência das adições minerais na reologia do concreto estrutural leve autoadensável (NBR 15823, 2010) e sua adequabilidade como autoadensável. As conclusões das análises das propriedades no estado fresco e endurecido, microestruturais e de durabilidade completam, de modo contundente, a eficiência da inclusão das adições minerais utilizadas em substituição parcial do cimento como conseqüência na redução da permeabilidade dos concretos.

Caracterização com relação à trabalhabilidade

Todos os concretos dosados apresentaram coesão e consistência adequados para auto-adensamento, bem como resistência à compressão axial e massa específica real para serem classificados como estrutural leve autoadensável. Não foram observados os fenômenos de segregação e exsudação nos concretos no estado fresco.

Propriedades de durabilidade

Os resultados das análises das propriedades do concreto que estão intimamente relacionadas com a sua durabilidade como absorção de água por imersão e capilaridade, porosidade total e permeabilidade a gás nitrogênio, demonstraram que os concretos com adição mineral atingiram valores indicadores deste índice bastante significativos, principalmente o concreto CELA 00M-20C, chegando a uma redução na permeabilidade a gás nitrogênio, comparado ao concreto sem adição, de 76%.

Propriedades Microestruturais

Com os resultados da análise de fluorescência de raios X, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura dos concretos estudados, observou-se que a utilização das adições minerais ocasionou uma redução da quantidade de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia. Observou-se, também a baixa quantidade da fase de Calcita nos concretos com adições minerais.

Na análise da zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia, utilizando-se a técnica de MEV, observou-se que a utilização das adições minerais contribuiu para um maior entrelaçamento entre o agregado e a matriz melhorando sua integridade e, provavelmente, proporcionando maior resistência a este tipo de concreto.

Pode-se ainda concluir, com relação à pozolanicidade da cinza de biomassa os seguintes aspectos:

- A alta área de superfície específica e a composição química ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ e $\text{CaO} > 10\%$) sugerem a pozolanicidade da cinza de biomassa de cana-de-açúcar, considerando-se os valores prescritos pela NBR 12653 (1992);
- O pico de maior intensidade no ensaio de difratometria 2θ ocorreu entre 20° e 39° e o contorno de uma estrutura granular na imagem do MEV mostra um mineral amorfo com poucos minerais cristalizados identificados;
- O retardo no tempo de pega inicial foi também registrado com o aumento da cinza do bagaço, provavelmente devido à redução da quantidade de hidróxido de cálcio (CH);
- O efeito filler, que preenche os vazios criados pela água livre na matriz, proporciona um melhor empacotamento. Porém como a cinza é muito mais fina que o cimento, acaba diminuindo a plasticidade do concreto, ocasionando aumento no consumo de água do concreto, principalmente para altos teores de substituição, necessitando-se de maiores quantidades de aditivos superplastificantes. É importante destacar que a elevada finura pode ocasionar a floculação do material, e dependendo da quantidade, tornar-se um problema.

- A presença de maior quantidade de cinza de biomassa no concreto (CELA 00M-20C) produziu um concreto mais denso e coeso, de elevada viscosidade e com menor tendência à exsudação, comprovado através de análise visual e do ensaio de espalhamento (menor que os demais concretos);
- Retardamento do processo de hidratação do cimento (menores resistências nas idades de 1, 7 dias e 28 dias) com resistência em longo prazo e redução da permeabilidade, provavelmente devido ao refinamento dos poros;
- O aumento da resistência mecânica pode estar relacionado com o processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta de cimento, na medida em que aumenta a resistência da matriz na zona de transição.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do desenvolvimento desta pesquisa e análises dos resultados, referentes ao desenvolvimento da tecnologia dos concretos estruturais leves e concretos estruturais leves autoadensáveis, foi observado que uma série de aspectos e outras variantes correlacionadas ao estudo mereciam maior aprofundamento científico. Com isso, apresentam-se algumas propostas de desenvolvimentos para trabalhos futuros:

- ✓ A inclusão das adições minerais aqui estudadas nos concretos estruturais leves;
- ✓ Análises de concretos estruturais leves autoadensáveis com menores valores de consumo de cimento;
- ✓ Desenvolvimento de método para dosagem de concretos estruturais leves autoadensáveis;
- ✓ Análise isolada das pastas de cimento com cinza de biomassa e metacaulim nas dosagens aqui apresentadas;
- ✓ Avaliação do concreto estrutural leve autoadensável submetido à alta pressão para simulação de bombeamento.

REFERÊNCIAS

- AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Ed. PINI. São Paulo, 2000.
- ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do concreto auto-adensável: produção de pré-fabricados**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.
- ALENCAR, R.; CUPERTINO, M. A.; BATTAGIN, I. **A norma Brasileira de concreto autoadensável**. In: *Concreto & Construções*. IBRACON, 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI 211.2-98) – ***Standart Praticce for Selecting for Strutctural Lightweight Concrete***. Março, 1998.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI 213R-87) – ***Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete***. Reported by ACI Committee 213. Reapproved 1999.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) – ***Building Code Requirements for Reinforced Concrete ACI 318-89 and Commentary ACI 318-R-89***, 1992.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1621. ***Standard test for passing ability of self-consolidating concrete by j-ring***. Philadelphia, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1610. ***Standard test for static segregation of self-consolidating concrete using column technique***. Philadelphia, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 23 – **Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 35 – **Agregados leves para concreto estrutural – Especificações**. Rio de Janeiro, 1995.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 45 – **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 47 – **Concreto - determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico**. Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 52 – **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR MN 67 – **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738 - **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739 - **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118 – **Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211 – **Agregados para concreto – especificações**. Rio de Janeiro, 2005b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9778 – **Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9779 – **Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653 - **Materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15630 – **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15823 – **Requisitos para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2010.
- ANJOS, M. A. S.; MOREIRA, H. P.; BORJA, E. V.; PEREIRA, A. C.; NETO, C. A. **Efeito da adição de cinza de biomassa da cana-de-açúcar como finos no concreto auto-adensável**. In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON. Fortaleza, 2010.
- ANJOS, M. A. S. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Natal, 2009.
- BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades Mecânicas de Pastas Pozolânicas**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFJR. Rio de Janeiro, 2004.
- BARBOSA, A. H.; OLIVEIRA, R. A. **Análise comparativa de custo entre o concreto convencional e o concreto auto-adensável em Macéio-AI**. In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON. Fortaleza, 2010.
- BARNES, B. D; DIAMOND, S.; DOLCH, W. L. **Micromorphology of the interfacial zone around aggregate in Portland cement mortar**. Journal American Ceramic Society. Vol. 62, p. 21-24. 1979.

- BARRINGER, W. L. **Before using fly ash**. In: *Concrete International*, Michigan, vol. 19, nº. 4. Abril, 1997.
- BARROS, P. G. S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito**. Dissertação (mestrado). UFAL. Maceió, 2008.
- BEN-OTHTMAN, B.; BUENFELD, N. R. **Oxygen permeability of structural lightweight aggregate concrete and aggregate**. In: *Protection of Concrete*. Dhir, R. K. and Green, J. W., Editors. E. & F.N. Spon. 1990.
- BENTUR, A.; COHEN, M. D. **Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars**. In: *Journal of the American Ceramic Society*, vol.70, 1987.
- BENTZ, D. P.; GAZBOCZI, E. J. **Modeling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity**. In: *Materials and Structures*, vol.25. 1992.
- BERNABEU. **“Final Report of Task 7: Form System and Surface Quality”**. *Rational Production and Improved Working Environment through Using Self-compacting Concrete*. Brite EuRam project BRPR-CT96-0366. 2000.
- BOGUE, R.H. **Chemistry of Portland cement**. New York. 1955.
- BORJA, E. V.; MEDEIRO, H.; ANJOS, M. A. S.; PEREIRA, A. C.; MARTINELLI, A. E. **Influência do uso de aditivos e adições minerais nas propriedades reológicas do concreto leve auto-adensável**. In: *Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON*. Fortaleza, 2010.
- BRETON, D.; CHARLES-GIBERGUES, A.; BALLIVY, G.; GRANDET, J. **Contribuion to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste**. In: *Cement and Concrete Research*, vol. 23. Março, 1993.
- BRITISH CEMENT ASSOCIATION (BCA) – **Concrete Practice**. Revised by R. A. Binns. Third Edition, 2002.

- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. Editora UFG. Goiânia, 1997.
- CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**. *Cerâmica*, n°. 54, 2008.
- CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Maceió, 2006.
- CEB-FIP. **Lightweight Aggregate and Technology**. 1st Edition. The Construction Press. London, 1977.
- CEN-prEN 205-25 – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **Béton: Performances, production et conformité**. 1999.
- CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. **Mix Proportioning**. In: *Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications*. Building Materials Series. Norwich, NY. 2002.
- CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C.; CHANG, J. J. **Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete**. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 5, pp. 197-205. 2003.
- CHOI Y. W.; KIM Y. J.; SHIN H. C.; MOON H. Y. **An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete**. In: *Cement Concrete Research*. 2006.
- CLARKE, J. L. **Design Requirements**. In: *Structural lightweight aggregate concrete*. Edited by J.L. Clarke. 2005.
- COELHO, F. C. A.; MESQUITA, E. F. T. **Avaliação das propriedades determinantes da durabilidade do concreto auto-adensável com incorporação de pó orgânico**. In: *VI Congresso Internacional sobre patologia y recuperación de estructuras*. Argentina. Córdoba, 2010.

- COELHO, F. C. A.; MESQUITA, E. F. T.; MARQUES, A. S.; CAVALCANTE, F. S. S. **Aspectos reológicos da pasta auto-adensável produzida com incorporação de resíduo de serragem de rochas ornamentais.** In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Fortaleza, 2010.
- COLEMAN, N. J.; PAGE, C. L. **Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing metakaolin.** In: *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 1, pp.147-154, 1997.
- CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- CORDEIRO, G. C. TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios.** *Revista Química Nova*, Vol. 2, no. 1, p.82-86, 2009.
- CORDEIRO, G. C. TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries.** *Revista do Ibracon de Estruturas e Materiais*. Vol.3, nº. 1, p.50-67, 2010.
- COMON, P. **Agregados de arcilla y de esquisto expandido.** *Revista IMCYC*, vol. XII, nº 70. Instituto Mexicano del Cemento y Del Concreto., 1974.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. **Durability of concrete structures.** Report of CEB-RILEN International Workshop. Copenhagen, Maio, 1983 (Bulletin d' information, 152, 1984).
- DACZKO, J. A.; VACHON, M. **Self-consolidating concrete (SCC).** In: *Significance of tests and properties of concrete & concrete-making materials*. Joseph F. Lamond and James H. Pielert, Editors. Bridgeport, NJ. 2006.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** In: *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. ed. G. C. ISAIA. 1ª edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

- DE PAUW, P.; TAERVE, L.; DESYMYTER, L. **Concrete and masonry rubble as aggregate for concrete, something in between normal and lightweight concrete.** In: *2nd Int. Symp. Structural Lightweight Aggregate Concrete 2000.* Kristiansand, Norway. 1995.
- DIAMOND, S. **The Microstructure of Cement Paste and Concrete – a Visual Primer.** *Cement and Concrete Composites.* Vol. 26, p. 919-933. 2004.
- DREUX, G. **Composition des Bétons Légers.** *Granulats et Bétons Légers, Presses de ENPC.* Paris, 1986.
- EFNARC - *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.* **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** London, Fevereiro, 2002.
- ELSHARIEF, A; COHEN, M. D.; OLEK, J. **Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar.** In: *Cement and Concrete Research,* n^o. 35, pp. 1368-1376. 2005.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 206-9. **Concrete – Part 9: Additional Rules for Self-Compacting Concrete (SCC).** Brussels, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 12350-8. **Testing fresh concrete – Part 8: Self-Compacting Concrete – Slump-flow test.** Brussels, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 12350-9. **Testing fresh concrete – Part 9: Self-Compacting Concrete – V-funnel test.** Brussels, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 12350-10. **Testing fresh concrete – Part 10: Self-Compacting Concrete – L-box test.** Brussels, 2010.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 12350-12. **Testing fresh concrete – Part 12: Self-Compacting Concrete – J-ring test.** Brussels, 2010.

- EUROPEAN PROJECT GROUP – EPG (BIBM; CEMBUREAU; ERMCO; EFCA; EFNARC). **“The European Guidelines for Self-Compacting Concrete”**. 63p. Surrey, 2005.
- EUROLIGHTCON – *Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete. LWAC material properties state-of-the-art. European Union – Brite EuRam III*, december, 1998.
- FERRAZ, P. G.; PRISZKULNIK, S. **Argila expandida na produção de concretos com massas específicas variáveis**. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. 2003.
- FERREIRA, R.; CARASEK, H.; CASCUDO, O.; LOPES, A. **Influência das adições minerais na penetrabilidade de íons cloreto no concreto de cobrimento**. In: 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. 2003.
- GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. **Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material**. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 29, pp. 515-524. 2007.
- GEYER, A. L. B. *et. al.* **Porosidade e permeabilidade do concreto**. Boletim Técnico da Escola da USP, Escola Politécnica de São Paulo, 2001.
- GJØRV, O. E.; MONTEIRO, P. J. M.; METHA, P. K. **Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond**. In: *ACI Materials Journal*, v.87, 1990.
- GIRALDO M., M. A.; TÓBON, J. I. **Evolución mineralógica del cemento Portland durante el proceso de hidratación**. *Dyna*, Año 73, nº 148, pp. 69-81. Medellin, 2006.
- GOYAL, A.; KUNIO, H.; HIDEHIKO, O.; MANDULA. **Properties and reactivity of sugarcane bagasse ash**. Japan, 2007.
- HAMROL, F. H. **Estudo do betão com inertes de argila expandida LECA – Relatório**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1972.

- HELA, R.; HUBERTO VÁ, M. **Development of lightweight self-compacting concrete using liapor lightweight aggregate**. In: *Centre for Integrated Design of Advanced Structures*. Czech Republic, 2005.
- HER-YUNG, W. **Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt**. In: *Construction and Building Materials*, n^o.23, pp.2332-2337, 2009.
- HO, D.W.S.; SHEINN, A.M.M.; TAM, C.T. **The use of quarry dust for SCC applications**. In: *Cement and Concrete Research*, n^o.32, p.505-511, 2002.
- HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. **High strength lightweight aggregate concrete**. In: *High performance concrete: properties and applications*. Shah S. P. and Ahamad S. H., Editors. Great Britain, McGraw-Hill, 1994.
- HOLM, T. A.; RIES, J. P. **Lightweight concrete and aggregate**. In: *Significance of tests and properties of concrete & concrete-making materials*. Joseph F. Lamond and James H. Pielert, Editors. Bridgeport, NJ, 2006.
- ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- JÖRG KROPP. **Relations between transport characteristics and durability**. In: *Performance criteria for concrete durability*. RILEM REPORT 12. 1995.
- KETT, I. **Engineered Concrete: Mix design and test methods**. Second Edition. RCC Press. New York, 2010.
- KHAYAT K. H.; ASSAAD J.; DACZKO J. **Comparison of field-oriented test methods to asses dynamic stability of self-consolidating concrete**. *ACI Mater Journal*. 2004.
- LAWRENCE, C. D. **Physicochemical and mechanical properties of Portland cements**. In: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Peter C. Hewlett editor. Publisher: Elsevier Science & Technology Books. 2004.

- LEGRAN, C.; WIRQVIN, E. **Effects of the initial structure of the cement paste in fresh concrete on the first development of strength. Influence of superplasticizer.** In: *9th International Congress on the Chemistry of Cement*. New Delhi, Vol.5, pp. 95-101. 1992.
- LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Maceió, 2004.
- LO, T. Y.; CUI, H. Z. **Effects of porous lightweight aggregate on strength of concrete.** In: *Materials Letters*, n^o. 58, pp. 916-919. 2004.
- LO, T. Y.; CUI, H. Z.; LI, Z. G. **The effects of air content on permeability of lightweight concrete.** University of Hong Kong, 2003.
- LO, T. Y.; CUI, H. Z.; TANG, W. C.; LEUNG W. M. **The effects of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete.** In: *Constructions and Building Materials*, n^o. 22, pp. 623-628. 2008.
- LO, T. Y.; TANG, W. C.; CUI, H. Z. **The effects of aggregate properties on lightweight concrete.** In: *Building and Environment*, n^o. 42, pp. 3025-3029. 2007.
- LO, T. Y.; GAO, A. P.; JEARY, A. P. **Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete.** In: *Building and Environment*, n^o. 34, pp. 759-764. 1999.
- MAGHSOUDI, A. A.; MOHAMAD POUR, S. **Rheological and engineering properties of SCLC.** 2009 (www.claisse.info/specialabstracts.htm).
- MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials.** *Advances in Concrete Technology*, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.
- MARTINS, M. L. C.; AZEVEDO, A. A.; GONÇALVES, R. B. A.; TORRES, A. S. **Estudo da viabilidade e potencialidades do concreto leve com argila expandida em processos construtivos.** In: Reunião Anual do IBRACON, 45, 2003.

- MANUEL, P. J. M. **Estudo da Influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. Dissertação (Mestrado). UFRS. Porto Alegre. 2005.
- MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F.; MIDDENFORD, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, J. **Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction**. *Cement and concrete Research*, vol. 88, nº 11, PP. 1525-1536. 1998.
- MASSAZZA, F., **Pozzolana and Pozzolanic Cements**. In: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*.; Ed. Hewlett P.C., 4th edition, J. Wiley. New York, 2004.
- MASO, J. C. **La Liaison Pâte-Granulats**, In: *Le Béton Hydraulique*, Eds. J. Baron and R. Sauterey, pp. 247-259. Paris, 1982.
- MAYCÁ, J.; CREMONINI, R.A.; RECENA, F.A.P. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para concretos leves estruturais (CLE)**. Curso de Especialização em Construção Civil – NORIE/UFRGS. Porto Alegre, 2009.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. IBRACON. São Paulo, 2008.
- MEHTA, P. K.; AITCIN P. C. **Principles Underlying Production of High-Performance Concrete**. *Cement, Concrete and aggregates*, Winter, Vol. 12, No. 2, p. 70-78,1990.
- MELO, A. **Caracterização de betões leves vibrocomprimidos com agregados de argila expandida**. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2000.
- MEYER, K. F.; KAHN, L. F. **Lightweight concrete reduces weight and increases span length of pretensioned concrete bridge girders**. In: *PCI Journal*, vol. 47, nº. 1, pp.68-75. Janeiro, 2002.

- MONTEIRO, P. J. M. **Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces. Aspectos de durabilidade e microfissuração.** Tese (livre docência), USP. São Paulo, 1993.
- MORAVIA, W. G. **Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida.** Tese (doutorado). UFMG. Belo Horizonte, 2007.
- MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; VASCONCELOS, W. L. **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve.** Cerâmica, vol. 52, p. 193-199, 2006.
- MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- MÜLLER H. S.; HAIST M. **Self-compacting lightweight concrete – technology and use.** In: *Concrete Plant. Precast Technology.* 2002.
- NASCIMENTO, R. M. **Estudo da aditivação do metacaulim de alta reatividade, produzido por meio do método de calcinação *flash* em cimento Portland.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
- NÓBREGA, A. K. C. **Materiais cimentantes de pega rápida à base de metacaulim.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Natal, 2006. 93 p.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Editora PINI . São Paulo, 1997.
- NEWMAN, J. R. **Properties of structural lightweight aggregates concrete.** In: *Structural lightweight aggregate concrete. Edited by J.L. Clarke.* 2005.
- OLIVEIRA, C. A. S. **Avaliação microestrutural e comportamento físico e mecânico de concretos de alto desempenho produzidos com metacaulim.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

- OWENS, P. L. **Lightweight aggregates for structural concrete**. In: *Structural lightweight aggregate concrete*. Edited by J.L. Clarke. 2005.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-Compacting Concrete**. In: *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 1, n^o.1, p. 5-15. Abril, 2003.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Development, present use and future**. In: *Self-compacting concrete. Proceedings of the first international RILEM symposium*. Edited by A. Skarendahl and Ö. Petersson. Japan, 1999.
- PAGNUSSAT, D.; MOURA, C.; TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Avaliação de concretos auto-adensáveis dosados pelo método Tutikian incorporando resíduos de serragem de mármore e granitos**. In: 48^o Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro, 2006.
- PALARETI, R. **Concreto autoadensável**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Anhembi Morumbi. São Paulo, 2009.
- PAULON, V. A.; MONTEIRO, P. J. M. **Estudo da Microestrutura da Zona de Transição entre a Pasta de Cimento e o Agregado**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/43. São Paulo, 1991.
- PEREIRA, M. R. **Estudo da adição de argila expandida na formulação de concretos leves**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Natal, 2008.
- PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**, 9^a ed. Atualizada e revisada por Vladimir Antônio Paulon. Porto Alegre, 1982.
- PERSSON, B. **Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete**. Cement and Concrete Research, n. 33, 2003.
- POON, C. S.; HO, D.W.S. **A feasibility study on the utilization of r-FA in SCC**. Cement and Concrete Research, n. 34, 2004.

- QUINTANA JÚNIOR, D.; BERTOCINI, S. R. **Estudo de concreto alto adensável com uso de areia artificial e fino de resíduo de vidro**. In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Fortaleza, 2010.
- REPETTE, W. L. **Concreto auto-adensável: características e aplicação**. Revista Técnica. Edição 135. Editora Pini. São Paulo, 2008.
- RILEM. **Terminology and definitions of lightweight concrete, Recommendation LCI, 1st edition**. 1975.
- RILEM. **Report 12. Performance criteria for concrete durability**. J. Kropp and H. K. Hilsdorf, eds. 1995.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos – dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.
- ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, V. C. **Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete**. In: *Cement and Concrete Research*, nº. 32, pp. 329-334. 2002.
- ROSSIGNOLO, J. A.; OLIVEIRA, I. L. **Efeito do metacaulim nas propriedades do concreto leve estrutural**. *Acta Sci. Technol.*, vol. 29, nº. 1. Maringá, 2007.
- SAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, I. O. **The affect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars**. In: *Concrete Composites*, nº. 28. 2006.
- SANTOS, S. P. A.; SILVA, A. S. R. **Propriedades reológicas do concreto autoadensável no estado fresco**. 2009.
- SARKAR, S. L., AIMIN, X., JANA, D. **Scanning electron microscopy X-ray microanalysis of concretes**. In: Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. (eds). *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology – Principles, techniques, and applications*, New Jersey: Noyes Publications, pp. 231-274. 2001.

- SCRIVENER K. L.; GARTNER, E. M. **Microstructural gradients in cement paste around aggregate particles**. In: *Bonding in Cementitious Composites*. Vol. 114, pp.77-85. Boston, 1998.
- SHI C. J.; WU Y. Z. **Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder**. In: *ACI Master Journal*. 2005.
- SILVA, B. M. M. **Betão leve estrutural com agregado de argila expandida**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2007.
- SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese (de doutorado). Universidade de São Paulo. Interunidades (EESC – IFSC – IQSC). Ciência e engenharia dos Materiais. São Carlos, 2006.
- SILVA, W. G.; DIAS, J. F.; DA SILVA, T. J. **Avaliação de concreto auto-adensável com agregado reciclado de telha cerâmica**. In: *Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON*. Fortaleza, 2010.
- SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - FRGS, 2003.
- SU N.; MIAO B. **A new method for the mix design of medium strength flowing concrete with low cement content**. In: *Cement and Concrete Composites*. 2003.
- TOPÇU, I. B.; UYGUNOĞLU, T. **Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC)**. In: *Construction and building material*, n.º. 24, pp.1286-1295. 2010.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Academy Press Inc. San Diego. 1990.
- TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

- TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método para dosagem experimental para concretos auto-adensáveis.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
- VITA, M. O.; GIROTTI, L. S.; BARBOSA, M. P.; REPETTE, W. L.; MACIEL, G. F. **Concreto auto adensável: estudo da influência de diferentes tipos de adições minerais na fluidez e no comportamento reológico.** In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Fortaleza, 2010.
- WATANABE, P. S. **Concretos especiais: propriedades, materiais e aplicações.** Relatório Final de Pesquisa. FAPESP. Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2008.
- WHITING, D. **Permeability of Concrete.** In: *Concrete Construction Engineering Handbook*. pp.105-225. American concrete Institute. Farmington Hill, MI. 1988.
- WILD, S.; KHATIB, J. M.; JONES, A. **Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metacaolin concrete.** In: *Cement and concrete research*, vol. 26, nº 10, pp. 1537-1544. 1996.
- WU, Z.; ZHANG, Y.; ZHENG, J. DING, Y. **An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete.** In: *Construction and Building Materials*, nº 23, pp. 2087-2092. 2009.
- ZHANG, M.-H; GJØRV, O.E. **Microstructure of the Interfacial Zone between Lightweight Aggregate and Cement Paste.** In: *Cement and Concrete Research*, vol. 20, nº. 4, pp. 610-618. 1990.
- ZAWADANIK, A.; EURICH, F.; MAGGI, P. L. O. **Desenvolvimento de traços de concreto leve.** In: Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. Curitiba, 2009.