UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INTERUNIDADES - CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e
Instituto de Química de São Carlos

CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO MODIFICADO COM SB PARA PRÉ-FABRICADOS ESBELTOS – DOSAGEM, PRODUÇÃO, PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA

JOÃO ADRIANO ROSSIGNOLO

Tese apresentada à Área Interunidades em
Ciência e Engenharia de Materiais, da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Doutor
em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos V. C. Agnesini

São Carlos
2003

*À minha Mãe, pelo incentivo e carinho, ao meu Pai,
à Tia Marlene, à toda minha família e
à família Silva: Eurípides, Maria, Alan Roger e Michelle.*

À Vivian Lara,
minha eterna e amada companheira.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus profundos agradecimentos ao Professor Doutor Marcos Vinício Costa Agnesini, pela valiosa orientação, amizade e incansável incentivo, ao longo desses últimos seis anos, que se mostraram fundamentais à realização do mestrado e desta tese, alicerces da minha formação pessoal e acadêmica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento desta pesquisa e do estágio de seis meses no Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, em Lisboa, Portugal.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, especialmente aos engenheiros José M. R. Catarino, A. Pinto Magalhães, Arlindo F. Gonçalves, Maria Manuella Salta, Manuel Vieira, A. Bettencourt Ribeiro, Rui Neves e António Santos Silva. Não podem faltar nesta lista Ana Paula Menezes, Ana Paula Melo, Ludovina Matos, Lúzia Barracha, Luís Nunes, Rosália C. Jesus e Maria do Céu Matias. Aos amigos lisboetas, meu sincero reconhecimento por todo o carinho e a atenção, ao longo desses seis meses de trabalho conjunto no LNEC.

Aos Professores Osny Pellegrino Ferreira, Laércio Ferreira e Silva, Vladimir A. Paulon, Paulo J. M. Monteiro, Eloy F. Machado Júnior, Jefferson B. L. Libório, Milton F. de Souza e Jasson R. Figueiredo Filho, pela valiosa contribuição a esta pesquisa.

Ao Laboratório de Engenharia de Estruturas do Departamento de Estruturas da EESC-USP, pela disponibilização de suas instalações para a realização das análises experimentais das peças pré-fabricadas.

Às empresas CIMINAS S.A. (grupo Holdercim), MICROSSÍLICA Tecnologia Indústria e Comércio Ltda., CINEXPAN S.A., MBT Brasil Ind. e Com. e RHODIA Brasil Ltda., pelo fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Não posso deixar de expressar meus agradecimentos aos amigos e funcionários do Laboratório de Construção Civil (LCC) e do departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC-USP.

Ao Professor Doutor Antonio C. Hernandez e à Wladerez Caiado, pelo auxílio e pela atenção.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
INTRODUÇÃO	1
Objetivos	3
Organização do documento	4
1. CONCRETO LEVE	5
1.1. Definições	5
1.1.1. Concreto leve estrutural (CLE)	6
1.1.2. Concreto leve de alto desempenho (CLAD)	6
1.2. Desenvolvimento histórico do concreto leve	8
1.3. Agregado Leve	11
1.3.1. Classificação	11
1.3.2. Processos de fabricação	11
1.3.3. Forma e textura superficial	12
1.3.4. Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação	14
1.3.5. Impurezas	15
1.3.6. Porosidade e absorção de água	15
1.4. Dosagem dos concreto leves	16
1.5. Produção dos concreto leves	17
1.5.1. Mistura e teor de umidade dos agregados	17
1.5.2. Transporte, lançamento e adensamento	18
1.5.3. Cura	19
1.6. Trabalhabilidade dos concretos leves no estado fresco	20
1.7. Propriedades dos concretos leves no estado endurecido	21
1.7.1. Resistência à compressão e massa específica	21
1.7.2. Resistência à tração	24
1.7.3. Módulo de deformação	26
1.7.4. Comportamento da curva tensão-deformação	28
1.7.5. Permeabilidade	29

1.7.6. Resistência à penetração de cloretos	30
1.7.7. Carbonatação	31
1.7.8. Resistência à abrasão	31
1.7.9. Retração por secagem	32
1.7.10. Fluência	32
1.7.11. Propriedades térmicas e resistência ao fogo	33
1.8. Zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento	34
1.9. Aplicações dos concretos leves	38
1.10. Impacto ambiental	44
1.11. Considerações finais sobre a aplicação dos concreto leves na produção de elementos esbeltos	45
2. CONCRETO MODIFICADO COM SB	47
2.1. Definição	47
2.1.1. Látex	47
2.1.2. Concreto modificado com látex	48
2.2. Produção dos concretos modificados com SB	48
2.3. Propriedades dos concretos modificados com SB	49
2.3.1. Propriedades no estado fresco	49
2.3.2. Propriedades no estado endurecido	51
2.4. Microestrutura da matriz de cimento modificada com SB	53
2.5. Considerações sobre o concreto leve modificado com SB	54
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	56
3.1. Caracterização dos materiais	56
3.2. Estudo da interação entre os materiais	57
3.3. Dosagens dos concretos	57
3.4. Produção dos concretos	58
3.4.1. Mistura dos materiais	58
3.4.2. Adensamento	60
3.4.3. Procedimento de cura	61
3.5. Procedimentos experimentais para caracterização das propriedades dos concretos leves	62
3.5.1. Procedimentos experimentais normatizados	62
3.5.2. Procedimentos experimentais não normatizados ou adaptados	62
3.6. Procedimento experimental para análise de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados submetidos à flexão	67
3.6.1. Características das peças	67
3.6.2. Produção das peças	69
3.6.3. Tipologia do carregamento	69
3.6.4. Equipamentos utilizados	71
3.6.5. Aplicação do carregamento	71

3.7. Procedimentos experimentais para a análise microestrutural	72
3.7.1. Pastas e concretos analisados	72
3.7.2. Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)	74
3.7.3. Difractometria de Raios-X (DRX)	75
3.7.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	76
3.7.4.1. <i>Introdução</i>	76
3.7.4.2. <i>Espectrografia por dispersão de energias (EDS)</i>	77
3.7.4.3. <i>Análise semiquantitativa da zona de transição por MEV assoc. a EDS</i>	78
3.7.4.4. <i>Mapas de Raios-X</i>	79
3.7.4.5. <i>Preparação das amostras</i>	80
3.7.5. Microscopia Ótica de Transmissão (MOT)	81
3.7.5.1. <i>Preparação das amostras</i>	82
 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	 84
4.1 Caracterização das propriedades dos concretos leves	84
4.1.1. Propriedades no estado Fresco	84
4.1.1.1. <i>Índice de consistência</i>	85
4.1.1.2. <i>Massa específica e teor de ar incorporado</i>	86
4.1.1.3. <i>Perda de consistência</i>	86
4.1.2. Propriedades no estado endurecido	87
4.1.2.1. <i>Resistência à compressão e massa específica</i>	87
4.1.2.2. <i>Resistência à tração</i>	92
4.1.2.3. <i>Módulo de deformação e diagrama tensão-deformação</i>	95
4.1.2.4. <i>Diagrama tensão-deformação com deformação controlada</i>	100
4.1.2.5. <i>Absorção de água por imersão e índice de vazios</i>	101
4.1.2.6. <i>Absorção de água por capilaridade</i>	103
4.1.2.7. <i>Coefficiente de permeabilidade</i>	105
4.1.2.8. <i>Resistência à penetração de cloretos</i>	105
4.1.2.9. <i>Resistência à agentes químicos</i>	107
4.1.2.10. <i>Resistência à abrasão por jateamento de areia</i>	112
4.1.2.11. <i>Resistência ao impacto</i>	114
4.1.2.12. <i>Retração por secagem</i>	115
4.2. Análise experimental de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados	119
4.3. Estudo microest. da matriz de cimento e da interface agregado-matriz	124
4.3.1. Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)	124
4.3.2. Difractometria de Raios-X (DRX)	129
4.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	135
4.3.3.1. <i>Análise das pastas</i>	135
4.3.3.2. <i>Análise da zona de transição agregado-matriz</i>	138
4.3.3.3. <i>Mapas de Raios-X</i>	148
4.3.4. Microscopia ótica de transmissão (MOT)	150

5. CONCLUSÕES	154
5.1. Dosagem e produção dos concretos leves	15
5.2. Caracterização das propriedades dos concretos leves	155
5.3. Análise de elementos construtivos esbeltos submetidos à flexão	157
5.4. Estudos microestruturais	158
5.5. Propostas de desenvolvimentos futuros	158
 ANEXO A. Caracterização dos materiais	 160
ANEXO B. Estudo da interação entre os materiais	169
ANEXO C. Dosagem dos concretos	177
ANEXO D. Estudo do processo de cura	189
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197

RESUMO

Esta tese aborda a aplicação da tecnologia dos concretos leves de alto desempenho (CLAD) para a produção de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados, tais como painéis estruturais e de vedação e peças para cobertura, apresentando um concreto com propriedades especiais em função da utilização conjunta de látex de estireno butadieno (SB), sílica ativa, superplastificante acelerador e agregados leves nacionais, denominado concreto leve de alto desempenho modificado com SB.

Desenvolveu-se um amplo programa experimental para a análise dos concretos, tendo como objetivos o estudo dos processos de dosagem e produção, caracterização das propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido, análise da ductilidade de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados submetidos à flexão, assim como a obtenção de informações microestruturais sobre a matriz de cimento e a zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Os resultados do programa experimental demonstraram que os concretos leves de alto desempenho modificados com SB são extremamente adequados à produção de elementos pré-fabricados esbeltos, devido essencialmente à redução da massa específica e ao excelente desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e durabilidade.

Nos estudos microestruturais, observou-se que a utilização de sílica ativa e de SB promoveram a diminuição da quantidade e do diâmetro dos poros capilares e da quantidade de hidróxido de cálcio (CH) na matriz de cimento, assim como reduziram a espessura da zona de transição agregado-matriz. Observou-se, também, que os concretos com agregados leves nacionais apresentaram valores da espessura da zona de transição agregado-matriz inferiores aos observados para os concretos com agregados tradicionais.

Palavras chaves: Concreto leve, concreto modificado com polímero, elementos pré-fabricados, microestrutura.

ABSTRACT

This dissertation deals with the application of the high performance lightweight aggregate concrete (HPLWAC) for the production of thin precast components, such as structural and insulation panels and elements for covering. A concrete with special properties was presented, once the use of styrene-butadiene latex (SBR), silica fume, accelerating superplasticizer and Brazilian lightweight aggregates, named SBR-modified high performance lightweight aggregate concrete.

Our main goals in the experimental program were the study of concrete dosage and production, the characterization of concretes properties, the thin precast components analysis, as well as the microstructural study about both cement paste and the interfacial transition zone (ITZ) between aggregate and cement paste.

The main results show that the SBR-modified HPLWAC are extremely appropriate to the production of thin precast components, due essentially to the density reduction and to the high performance of mechanical and durability properties.

Besides this, it was viewed that the silica fume and SBR use promote the decrease of the amount and diameter of the capillary pores, as well as the amount of calcium hydroxide (CH) in the cement paste. Additionally, they reduce the thickness of the interfacial transition zone between aggregate and cement paste. It was also observed that the concretes with Brazilian lightweight aggregate presented lower values of the interfacial transition zone thickness than the ones observed for the concretes with traditional aggregates (basalt).

Key words: Lightweight aggregates concrete, polymer-modified concrete, precast elements, microstructure.

INTRODUÇÃO

Desde a invenção do concreto moderno, em meados do século XIX, até o início da década de 80, o concreto continuou sendo uma mistura de agregados, cimento e água, sem grandes inovações que alterassem significativamente o desempenho de suas propriedades.

Mas, nas duas últimas décadas, a tecnologia do concreto sofreu um grande desenvolvimento que, segundo diversos pesquisadores, como ZHANG e GJØRV (1991a), ALMEIDA (1996), PAULON (1996), OHAMA (1998), HELENE (1999) e AÏTCIN (1999), ocorreu devido à evolução das técnicas e equipamentos para estudo dos concretos e ao uso de novos materiais. Estes novos materiais, dentre os quais destacam-se os aditivos redutores de água e as adições minerais, possibilitaram melhorias significativas nas propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos. Dentre as novas técnicas de estudo dos concretos, destacam-se as técnicas de estudos microestruturais, que permitiram o conhecimento aprofundado da microestrutura da matriz de cimento e da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

O desenvolvimento destes novos materiais e técnicas de estudos resultou em um incremento da utilização dos concretos especiais, principalmente os concretos de alto desempenho (CAD). SISEL (2000) afirma que, atualmente, o conceito mais moderno de construção de edifícios de grande altura, em todo o mundo, é aquele que utiliza, conjuntamente, as tecnologias do CAD e do aço, como nos edifícios Petronas Tower (Malásia), Di Wang Building (Shenzen) e Central Station (Hong Kong).

Nos últimos anos, algumas pesquisas foram realizadas com o intuito de otimizar, ainda mais, as propriedades dos concretos de alto desempenho. Dentre elas, duas linhas de estudo se destacam: a união das características otimizadas do CAD com a baixa

massa específica dos concretos leves estruturais (CLE), obtendo-se, assim, o concreto leve de alto desempenho (CLAD) e a utilização de polímeros na modificação de concretos, obtendo-se, assim, os concretos modificados com polímeros (PCM).

Os concretos com agregados leves têm sido utilizados desde o início do século passado, para fins estruturais e de vedação, com excelentes resultados. A partir de 1980, foram realizadas rigorosas pesquisas sobre os concretos leves, em todo o mundo, demonstrando o grande potencial do uso desse material, nas mais diversas áreas da construção civil. A redução da massa específica do concreto, com a manutenção da resistência mecânica, propicia a redução do peso próprio e das cargas na fundação, com conseqüente redução do custo final da obra (SLATE et al., 1986; MORENO, 1986; BERNER, 1991; ZHANG e Gjølrv, 1991a; HOLM e BREMNER, 1994; IKEDA, 2000; Vieira e gonçaves, 2000; ROSSIGNOLO et al., 2001).

Segundo ALDUAIJ et al. (1999) e HAQUE e AL-KHAIAT (1999), existe uma tendência mundial crescente, baseada em critérios econômicos e técnicos, do uso do CLAD com finalidade estrutural e de vedação na construção civil, especialmente com a utilização da tecnologia dos pré-fabricados.

Entretanto esse tipo de concreto encontra pouca aplicação no Brasil e, atualmente, há pouca informação disponível sobre as propriedades dos concretos com agregados leves nacionais (TEZUKA, 1973; ARMELIN et al., 1994; SOBRAL, 1996; EVANGELISTA et al., 1996).

A segunda linha de estudo que se destaca é a utilização de polímeros na otimização das propriedades dos concretos. O processo de modificação se apresenta como uma das formas de utilização dos polímeros em concretos, em que se adiciona o polímero à mistura ainda fresca, sem alteração do processo de produção, obtendo-se, assim, o concreto modificado com polímero (PCM).

O látex de estireno butadieno (SB) mostra-se como um dos tipos de polímeros usualmente utilizados para modificação de concretos e argamassas. Segundo alguns autores, como TEZUKA (1988), WALTERS (1990), AFRIDI et al. (1995), SHARKER et al. (1997), OHAMA (1998), FOWLER (1999) e ROSSIGNOLO (1999), os concretos e argamassas modificados com SB apresentam melhoria de desempenho significativa nas propriedades relacionadas a durabilidade e a resistência à tração.

Com a intenção de contribuir para os estudos de desenvolvimento de concretos para elementos pré-fabricados de pequena espessura, iniciados na Escola de Engenharia de São Carlos (USP) na década de 60, este trabalho apresenta um estudo experimental sobre a utilização de SB nos concretos leves de alto desempenho.

Estudos realizados a partir de 1998, no Laboratório de Construção Civil da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, demonstraram que há um grande potencial de utilização dos concretos leves, com agregados nacionais (argila expandida), na produção de elementos pré-fabricados de pequena espessura, tais como painéis estruturais e de vedação (Agnesini e Gomes Neto, 1998).

O estudo da utilização de SB no CLAD, obtendo-se, assim, o concreto leve de alto desempenho modificado com SB, tem como objetivo principal otimizar o desempenho das propriedades do CAD, como durabilidade e resistência mecânica, utilizando-se, ainda, as vantagens da redução da massa específica do concreto, com a utilização de agregados leves, disponibilizando, ao setor da construção civil, um material com características e propriedades diferenciadas dos já estudados.

Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo o estudo sobre a aplicação da tecnologia dos concretos leves de alto desempenho para a industrialização de elementos pré-fabricados de pequena espessura, sob condições rigorosas de controle de qualidade, tais como painéis estruturais e de vedação, peças para cobertura e vigamentos para pontes e edifícios, apresentando um concreto com propriedades especiais, em função da utilização conjunta de látex de estireno butadieno (SB), sílica ativa, superplastificante acelerador e agregados leves.

Os objetivos específicos desta pesquisa podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

- especificação, caracterização e estudo da interação entre os materiais;
- dosagem dos concretos leves;
- estudo da produção dos concretos leves;
- caracterização das propriedades dos concretos leves;

- avaliação da ductilidade e da tenacidade de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados, em escala real, submetidos à flexão; e
- análise microestrutural da matriz de cimento e da zona de transição interfacial entre a matriz de cimento e o agregado.

Por meio deste estudo, pretende-se disponibilizar, ao setor de construção civil, especificamente de construções industrializadas, um concreto com características e propriedades diferenciadas, além de contribuir para a divulgação e melhor entendimento dos concretos com agregados leves nacionais.

Organização do documento

Este documento está dividido em 5 capítulos. No primeiro, faz-se uma abordagem do tema genérico dos concretos com agregados leves, ressaltando as modificações ocasionadas pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves, e se apresentam alguns dados históricos sobre a utilização deste material na construção civil, destacando-se algumas aplicações recentes.

O segundo capítulo trata de uma exposição sobre as principais propriedades dos concretos modificados com SB. Ao fim desse capítulo, faz-se uma análise das propriedades esperadas dos concretos leves modificados com SB.

No terceiro capítulo, apresentam-se as informações sobre os materiais, dosagem e produção dos concretos leves, bem como os procedimentos experimentais utilizados na caracterização das propriedades desses materiais, na análise das peças pré-fabricadas e no estudo microestrutural da matriz de cimento e da zona de transição matriz-agregado.

O capítulo seguinte, apresenta a discussão dos resultados obtidos nos estudos experimentais.

No quinto e último capítulo, faz-se uma exposição das conclusões finais e apresentam-se sugestões para desenvolvimentos futuros.

1. CONCRETO LEVE

Tradicionalmente, os concretos leves são diferenciados dos concretos convencionais pela redução da massa específica e alterações das propriedades térmicas. Entretanto essas não são as únicas características importantes que justifiquem a atenção especial aos concretos leves. Além das características citadas anteriormente, a utilização de agregados leves ocasionam mudanças significativas em outras importantes propriedades dos concretos, como trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de deformação, retração e fluência, além da redução da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Assim, este capítulo apresenta algumas propriedades e características dos agregados leves e dos concretos leves, com a intenção de avaliar as alterações ou modificações que ocorrem nos concretos decorrentes da substituição dos agregados tradicionais por agregados leves. Apresentam-se, também neste capítulo, um breve histórico e as principais aplicações dos concretos leves estruturais.

1.1. Definições

Usualmente, utiliza-se a designação concreto leve para identificar concretos com estrutura porosa, geralmente à base de ligantes hidráulicos, com massa específica inferior à dos concretos tradicionais, que podem ser obtidos com a utilização de agregados leves, com a incorporação de ar (concretos celulares) ou sem finos. Neste trabalho, estudou-se, apenas, os concretos com agregados leves para aplicação estrutural, denominados concretos leves estruturais (CLE). Por vezes, usa-se o termo concreto leve neste trabalho, mas sempre para designar concreto leve estrutural.

1.1.1. Concreto leve estrutural (CLE)¹

Os concretos leves estruturais são obtidos com a substituição total ou parcial dos agregados tradicionais por agregados leves e, usualmente, são caracterizados pelo valor da massa específica. Considera-se concreto leve estrutural aquele que apresenta massa específica seca abaixo de 2000 kg/m³. A Tabela 1.1 apresenta os valores limites de massa específica citados em alguns documentos normativos ou de referência para os concretos leves.

TABELA 1.1. Dados de referência da massa específica dos concretos leves

<i>Referência</i>	<i>Massa específica (kg/m³)</i>
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 206-25 (1999)	$800 \leq \gamma \leq 2000$

O ACI 213R-87 (1997) especifica, ainda, que o concreto leve, além de apresentar o valor da massa específica dentro dos limites apresentados na Tabela 1.1, deve apresentar resistência à compressão acima de 17,2 MPa.

Segundo a NM 35/95 da ABNT, os agregados leves, utilizados na produção dos concretos leves, não devem apresentar massa unitária no estado seco e solto acima de 1120 kg/m³, para agregados miúdos, e 880 kg/m³, para agregados graúdos. Este documento normativo apresenta ainda valores mínimos de resistência à compressão para os concretos em função da massa específica, conforme apresentado na Tabela 1.2.

1.1.2. Concreto leve de alto desempenho (CLAD)

Segundo o American Concrete Institute – ACI (1990), o concreto de alto desempenho (CAD) pode ser definido como o concreto que atende os requisitos de

¹ Informações sobre concretos celulares e concretos sem finos podem ser obtidas em SOBRAL (1996) e NEVILLE (1997).

uniformidade e apresenta desempenho especial. Considera-se esta definição mais adequada do que aquelas baseadas unicamente na resistência mecânica do concreto.

TABELA 1.2. Valores correspondentes de resistência à compressão e massa específica para concretos leves (NM 35/95)

<i>Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) (Valores mínimos)</i>	<i>Massa específica (kg/m³) (Valores máximos)</i>
28	1 840
21	1 760
17	1 680

Segundo AİTCIN (2000) e SILVA (2000), uma definição ainda mais adequada para os concretos de alto desempenho deveria basear-se em pelo menos três fatores: resistência mecânica, propriedades relativas à durabilidade e relação água/aglomerante. Para o caso específico dos concretos leves, um outro parâmetro muito importante deve ser levado em conta: a massa específica.

Segundo SPITZNER (1994) e HOLM (2000), o concreto leve de alto desempenho (CLAD) pode ser definido através de um parâmetro que relaciona a resistência à compressão e a massa específica. Essa relação, denominada Fator de Eficiência, é apresentada na equação 1.1.

$$\text{Fator de eficiência} = f_c / \gamma \quad (\text{MPa} \cdot \text{dm}^3/\text{kg}) \quad (1.1)$$

Onde: f_c = resistência à compressão (MPa);

γ = massa específica seca do concreto(kg/dm³).

De acordo com SPITZNER (1994) e ARMELIN et al. (1994), é considerado como concreto leve de alto desempenho um concreto com fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg. Este valor limite foi obtido tendo como referência um concreto com agregados tradicionais, com resistência à compressão de 60 MPa e massa específica de 2400 kg/m³, classificado por SPITZNER (1994) como de alta resistência. Assim, considera-se como concreto leve de alto desempenho, por exemplo, um concreto com resistência à compressão de 30 MPa, desde que sua massa específica seja inferior a 1200 kg/m³.

Nesta pesquisa, utilizou-se o fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg para a designação do concreto leve de alto desempenho (CLAD), mesmo entendendo que esta definição seja simplista e que o CLAD deva ser definido em função de outros parâmetros, além da resistência à compressão e da massa específica, como a relação água/aglomerante e propriedades relacionadas à durabilidade.

1.2. Desenvolvimento histórico do concreto leve

As primeiras indicações da aplicação dos concretos leves datam de aproximadamente 3000 anos (1100 A.C.), quando construtores pré-Colombianos, que viveram na atual cidade de El Tajin (México), utilizaram uma mistura de pedra pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal para a construção de elementos estruturais (VIEIRA, 2000).

Os concretos leves também foram utilizados pelos romanos, com a intenção de reduzir as cargas nas estruturas, combinando um ligante à base de cal e rochas vulcânicas. Uma das principais construções com concretos leves da época romana data do início do segundo século da nossa Era (110 – 125 D.C.), quando o Panteão de Roma foi reconstruído pelo imperador Adriano, após ter sido destruído por um incêndio (Figura 1.1). Foi utilizado concreto leve com pedra pomes para a construção da cúpula abobadada desse monumento com 44 m de diâmetro e que se encontra, atualmente, em excelente estado de conservação, após quase 2000 anos de sua construção (MITIDIERI, 1976).

Segundo HOLM e BREMNER (1994), o início da utilização de concretos de cimento Portland com agregados leves, tal qual o conhecemos hoje, ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando a American Emergency Fleet Building Corporation construiu embarcações com concreto leve, utilizando xisto expandido, com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica em torno de 1700 kg/m³, enquanto o valor usual de resistência à compressão dos concretos tradicionais, na época, era de 15 MPa.

Um exemplo dessas embarcações é o navio norte-americano USS Selma (Figura 1.2), construído em 1919 utilizando-se concreto leve com resistência à compressão de 35MPa e massa específica de 1600 kg/m³, ou seja, com fator de eficiência de 22 MPa.dm³/kg - valor considerado extraordinário para os materiais e a tecnologia disponíveis na época. Análises realizadas na década de 80 nessa embarcação demonstraram que o concreto leve utilizado apresentou desempenho satisfatório de

durabilidade, além da manutenção da resistência mecânica (HOLM e BREMNER, 1994).

FIGURA 1.1. Panteão de Roma

FIGURA 1.2. Embarcação USS Selma

No início dos anos 30, o concreto leve foi utilizado para construção da pista superior da ponte na baía de São Francisco (EUA) e, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), esse fato proporcionou uma economia em torno de 3 milhões de dólares em aço.

Durante a Segunda Guerra Mundial, foram construídos 488 navios com concreto leve, permitindo uma grande economia de chapas de aço. Após a Segunda Guerra Mundial, houve um considerável aumento dos estudos e aplicações do concreto leve para execução de estruturas de edifícios, tabuleiros de pontes e construções pré-fabricadas.

A partir da década de 50, edifícios de múltiplos pavimentos foram executados com concreto leve, tais como Australia Square Tower (Austrália) em 1967, Park Regis (Austrália) em 1968, Standart Bank (África do Sul) em 1970 e o BMW Building (Alemanha) em 1972 (Figura 1.3).

Australia Square Tower

Park Regis

Standart Bank

BMW Building

FIGURA 1.3. Edifícios de múltiplos pavimentos executados com concreto leve

Foi, também, a partir dos anos 50 que se iniciou a aplicação dos concretos leves em construções pré-fabricadas, uma das mais vantajosas aplicações desse tipo de concreto (Figura 1.4).

Rússia (1967)

Áustria (1968)

FIGURA 1.4. Construções com pré-fabricados em concreto leve

A partir dos anos 70, com o rápido aprimoramento da tecnologia dos concretos e o desenvolvimento de novos materiais componentes, tornou-se mais fácil a obtenção de concretos com alta resistência mecânica e alta durabilidade. Esses desenvolvimentos também foram aplicados nos concretos leves, aumentando, ainda mais, o potencial de utilização desse material na construção civil. Alguns estudos recentes apresentam concretos leves com resistência à compressão superior a 100 MPa, com respectiva massa específica em torno de 1750 kg/m^3 (fator de eficiência igual a $57 \text{ MPa.dm}^3/\text{kg}$) (ZHANG e GJφRV, 1991a).

No Brasil, os estudos e a utilização dos concretos leves tiveram início em 1970, com a implantação de uma unidade de produção de agregados leves (argila expandida) pelo Grupo Rabello, a CINASITA S.A. (atualmente CINEXPAN S.A.), com a finalidade de fornecer agregados leves para a CINASA - Construção Industrializada Nacional - também do Grupo Rabello, para a produção de elementos pré-fabricados leves. Entretanto desde o início da produção de agregados leves no Brasil, o concreto leve nacional foi motivo de poucos estudos e encontra utilização modesta na construção civil (TEZUKA, 1973; ARMELIN et al., 1994; SANTOS et al., 1994, SOBRAL, 1996, EVANGELISTA et al., 1996).

1.3. Agregado leve

Os concretos são materiais heterogêneos e suas propriedades dependem, essencialmente, das propriedades individuais de cada componente e da compatibilidade entre eles. As principais propriedades dos concretos influenciadas pela substituição dos agregados tradicionais por agregados leves são massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Para a dosagem e produção adequada dos concretos leves estruturais, mostra-se fundamental o conhecimento das propriedades dos agregados leves utilizados, que podem variar significativamente, em função da matéria prima utilizada e do processo de fabricação. Por isso, em seguida, apresentam-se informações sobre as características e as propriedades dos agregados leves utilizados na produção dos concretos leves estruturais.

1.3.1. Classificação

Os agregados leves podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os agregados leves naturais são obtidos através da extração direta em jazidas, seguida de classificação granulométrica. Esse tipo de agregado leve tem pouca aplicação em concretos estruturais em função da grande variabilidade de suas propriedades e da localização das jazidas. Como exemplo, têm-se a pedra pomes e as escórias vulcânicas.

Os agregados leves artificiais são obtidos em processos industriais e, normalmente, são classificados com base na matéria-prima utilizada e no processo de fabricação. Como exemplo, têm-se argilas, folhelhos e escórias expandidas.

1.3.2. Processos de fabricação²

Os dois processos mais utilizados para a fabricação dos agregados leves são Sinterização e Forno Rotativo. No processo de sinterização a matéria-prima é misturada com uma proporção adequada de combustível, podendo ser carvão finamente moído ou

² Mais informações sobre as matérias-primas e a produção dos agregados leves podem ser obtidas em SOBRAL (1996), NEVILLE (1997b), EUROLIGHTCON (1998), GOMES NETO (1998), EUROLIGHTCON (2000d) e VIEIRA (2000).

coque. Em seguida, submete-se esse material a altas temperaturas, utilizando uma grelha móvel, com conseqüente expansão, em função da formação de gases (GOMES NETO, 1998).

SANTOS et al. (1986) afirmam que o agregado obtido pelo processo de sinterização apresenta os poros abertos, sem recobrimento e com altos valores de absorção de água. Além disso, o produto final desse processo é um clínquer muito irregular e de arestas “vivas”, que exige britagem para atender a todas as graduações granulométricas necessárias para a produção dos concretos leves. Normalmente, os valores da massa específica deste tipo de agregado variam entre 650 e 900 kg/m³.

O processo de forno rotativo, também denominado Nodulação, aproveita as características que determinados materiais têm de se expandirem, como algumas argilas, quando submetidos a temperaturas elevadas (entre 1000 e 1350°C), próximos do ponto de fusão incipiente, em decorrência da formação de gases que ficam aprisionados pela “capa” externa vítrea da partícula (SANTOS et al., 1986).

Os agregados produzidos pelo processo de forno rotativo, normalmente, apresentam granulometria variada, formato arredondado regular e âmago formado por uma massa esponjosa micro-celular, envolta por uma casca cerâmica vitrificada, resistente e com baixa permeabilidade, que confere ao agregado uma porosidade fechada. O agregado produzido por este processo recebe também a denominação de “encapado”, pois possui uma camada externa de material vítreo, que diminui significativamente a absorção de água.

As Figuras 1.5a e 1.5b ilustram a diferença na estrutura interna e na porosidade da superfície dos agregados produzidos pelos processos de sinterização e forno rotativo, respectivamente.

Os agregados leves nacionais utilizados nesta pesquisa, são produzidos pelo processo de forno rotativo utilizando a argila como matéria prima.

1.3.3. Forma e textura superficial

A forma e a textura superficial dos agregados leves influenciam algumas propriedades importantes dos concretos, como a resistência mecânica, por exemplo, pois estão relacionadas com a quantidade de água necessária para a obtenção da trabalhabilidade desejada.

FIGURA 1.5. Micrografia (MEV) dos agregados produzidos pelos processos de (a) sinterização e (b) forno rotativo (Fonte: ZHANG e GJφRV, 1991b)

A textura e a forma das partículas dos agregados leves artificiais dependem, essencialmente, do processo de fabricação. Os agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa. Esse tipo de agregado proporciona boa aderência à pasta de cimento, em função da rugosidade da superfície, entretanto apresenta, também, altos valores de absorção de água, em função da alta porosidade externa. Em decorrência da forma angular, esses agregados aumentam a quantidade de água da mistura para a obtenção da trabalhabilidade desejada. (ZHANG e GJφRV, 1990a; CEB/FIP, 1977).

Uma outra desvantagem da utilização de agregados leves produzidos por sinterização é a penetração da pasta de cimento nos poros externos, que pode variar de 30 a 100 kg de cimento por m³ de concreto, aumentando assim o consumo de cimento e a massa específica do concreto.

Por outro lado, os agregados produzidos em fornos rotativos, como as argilas expandidas, normalmente apresentam forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade, possibilitando, assim, a obtenção de boa trabalhabilidade com baixas relações água/cimento. Entretanto, em função do formato esférico, esse tipo de agregado apresenta maior facilidade de segregação do que o produzido por sinterização (CEB/FIP, 1977).

Na maioria dos processos de fabricação de agregados leves, o diâmetro das partículas varia entre 1 e 25 mm e os agregados apresentam valores de massa específica inversamente proporcional ao diâmetro.

1.3.4. Estrutura interna, resistência mecânica e módulo de deformação

A redução da massa específica dos concretos leves estruturais deve-se à utilização de agregados com baixos valores de massa específica. Como as matérias-primas dos agregados leves e dos agregados convencionais apresentam valores de massa específica da mesma ordem de grandeza, utiliza-se a inclusão de uma estrutura porosa no agregado para a redução deste índice físico, alterando-se assim, a estrutura interna do agregado (CEB/FIP, 1977).

A estrutura interna tem um efeito importante na resistência mecânica e no módulo de deformação dos agregados leves. Para a mesma matéria-prima e processo de fabricação, agregados com estrutura bastante porosa são menos resistentes do que os agregados com estrutura pouco porosa. O tamanho e a distribuição dos poros também são decisivos na resistência mecânica dos agregados leves. Para um mesmo grau de porosidade, é interessante que haja uma distribuição uniforme de pequenos poros, ao invés de poucos poros de grande diâmetro. A redução da porosidade, em algumas áreas específicas, também influencia a resistência mecânica do agregado. Pode-se citar, como exemplo, a argila expandida, em que a camada externa de baixa porosidade aumenta a resistência mecânica deste agregado (HOLM e BREMNER, 1994).

O valor do módulo de deformação dos agregados leves pode ser estimado segundo a Equação 1.2 (FIP, 1983), que relaciona o módulo de deformação E_c (MPa) e a massa específica γ (kg/m^3) do agregado leve. Segundo HOLM e BREMNER (1994), os valores do módulo de deformação dos agregados leves utilizados em concretos estruturais variam entre 10 e 18 GPa.

$$E_c = 0,008 \cdot \gamma^2 \text{ (MPa)} \quad (1.2)$$

De acordo com HOLM e BREMNER (1994), os agregados leves com baixa resistência mecânica têm pouca participação na transmissão das tensões internas no concreto. Assim, quanto maior for a diferença entre os valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento, maior será a diferença entre a resistência à compressão da matriz de cimento e do concreto. O aumento do módulo de deformação do agregado leve aumenta também os valores da resistência à compressão e o do módulo do concreto.

1.3.5. Impurezas

Em geral, os agregados leves artificiais, produzidos com argila expandida são quimicamente inertes e livres de impurezas. Entretanto no caso da argila obtida de jazidas onde se alternam camadas de argila com outras de calcário, os grãos poderão conter partículas de cal, com tendência a criar eflorescência na presença de água.

1.3.6. Porosidade e absorção de água

As características de porosidade e absorção de água dos agregados leves afetam significativamente as propriedades dos concretos no estado fresco e o processo de hidratação do cimento. A velocidade e a quantidade de água absorvida pelos agregados leves dependem dos seguintes fatores: porosidade total; conectividade entre os poros; características da superfície do agregado e umidade do agregado antes da mistura (NEVILLE, 1997a; EUROLIGHTCON, 1998).

Outros fatores que podem influenciar a absorção de água dos agregados são os aditivos, a temperatura e a pressão de bombeamento, no caso de concreto bombeado. A absorção de água dos agregados é proporcional à consistência do concreto e pode aumentar com o uso de superplastificantes. A utilização de agentes retardadores pode aumentar, também, a absorção de água dos agregados, pois aumenta o tempo entre a mistura e o início do endurecimento do concreto. Quando se utiliza o concreto bombeado, o agregado absorve uma quantidade adicional de água em função das altas pressões utilizadas (CEB/FIP, 1977).

Para agregados leves com altos valores de absorção de água, recomenda-se a pré-saturação para evitar prejuízo da trabalhabilidade do concreto no estado fresco e evitar a formação de bolhas de ar ao redor do agregado, como apresentado na Figura 1.6. A pré-saturação dos agregados aumenta a absorção final de água dos agregados, entretanto reduz a absorção de água após a mistura.

A alta quantidade de água absorvida pelo agregado leve pode ser desfavorável à algumas propriedades do concreto no estado endurecido, como o aumento da retração por secagem, aumento da massa específica e redução da resistência ao fogo. Entretanto, a absorção de água dos agregados leves apresenta alguns aspectos positivos, como a melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, através da redução do efeito parede. Além disso, a água absorvida pelo agregado leve

beneficia a “cura interna” do concreto (HOLM e BREMNER, 1994; ZHANG e GJØRV, 1991b).

FIGURA 1.6. Acúmulo de bolhas de ar ao redor do agregado leve decorrente da absorção de água (Fonte: EUROLIGHTCON, 2000c)

A Tabela 1.3 apresenta os valores de absorção de água, assim como outras características, de alguns agregados leves comerciais nacionais, europeus e norte-americanos.

1.4. Dosagem dos concretos leves

Os métodos utilizados para dosagem dos concretos com massa específica normal podem ser utilizados para os concretos leves, entretanto três fatores adicionais devem ser considerados: a necessidade de projetar um concreto com massa específica particular, a influência dos agregados leves nas propriedades dos concretos e a absorção de água dos agregados leves.

Na literatura consultada foram observados alguns métodos de dosagem específicos para os concretos com agregados leves, dentre eles destacam-se os descritos pela CEB/FIP (1977), ACI (1997) e EUROLIGHTCON (2000a).

TABELA 1.3. Características de alguns agregados leves comerciais

<i>Nome comercial</i>	<i>País</i>	<i>Matéria-prima</i>	<i>Fabricação</i>	<i>Massa específica (kg/dm³)</i>	<i>Massa unitária (kg/dm³)</i>	<i>Dimensão (mm)</i>	<i>Absorção de água 24h (%) *</i>
Lytag	Inglaterra e Holanda	Cinzas volantes	Sinterização	1,3 - 2,1	0,6 - 1,1	0,5 - 19	15 - 20
Solite	EUA	Folhelho	Forno rotativo	1,4	0,8	4 - 16	15
Norlite	EUA	Folhelho	Forno rotativo	0,8 - 1,9	0,4 - 1,2	5 - 19	10 - 25
Liapor	Alemanha e R. Tcheca	Argila	Forno rotativo	0,6 - 1,8	0,3 - 0,9	2 - 19	11 - 17
Leca	Áustria e Noruega	Argila	Forno rotativo	0,6 - 1,8	0,3 - 0,9	0,5 - 16	11 - 30
Arlita	Espanha	Argila	Forno rotativo	1,4	0,8	1 - 10	13,0
Cinexpan 0500	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,5	0,9	0,5 - 5	7,0
Cinexpan 1506	Brasil	Argila	Forno rotativo	1,1	0,6	6 - 15	7,5

* Absorção de água, em massa, dos agregados após 24 horas de imersão.

1.5. Produção dos concretos leves³

1.5.1. Mistura e teor de umidade dos agregados

Na mistura dos materiais em equipamentos com eixo inclinado, observa-se, no início da mistura, a segregação dos agregados leves graúdos, que tendem a sair do misturador, mas, após algum tempo de mistura, esse problema desaparece. No misturador vertical, preferível segundo o CEB/FIP (1977), esse problema não ocorre.

Alguns cuidados devem ser tomados no momento da mistura dos materiais na produção dos concretos leves, para evitar que a absorção de água dos agregados leves prejudique algumas propriedades dos concretos, principalmente, no estado fresco (HOLM e BREMNER, 2000).

Se o concreto for produzido com agregados leves com baixa absorção de água, valores abaixo de 10%, em massa, após 24 horas de imersão, na maioria das vezes,

³ Mais informações sobre a produção dos concretos leves podem ser obtidas em TEZUKA (1973), EUROLIGHTCON (1998), HOLM e BREMNER (2000) e VIEIRA (2000).

pode-se adotar o método de mistura utilizado para os concretos tradicionais e utilizar os agregados nas condições ambientais de umidade, isto é, sem saturação prévia. Alguns tipos de agregados leves, mesmo com valores de absorção de água abaixo de 10% após 24 horas de imersão, apresentam alta absorção de água, nos primeiros minutos, seguido de estabilização. Nesses casos, deve-se adicionar os materiais sólidos e a água juntos no misturador e, em seguida, os agregados leves (HOLM e BREMNER, 2000).

Por outro lado, se o agregado leve utilizado apresenta altos valores de absorção de água após 24 horas de imersão, acima de 10%, em massa, recomenda-se realizar a pré-saturação destes agregados. Caso este procedimento não seja realizado, haverá dificuldade em manter a trabalhabilidade adequada do material durante o lançamento (HOLM e BREMNER, 2000; ZHANG e GJØRV, 1991a).

1.5.2. Transporte, lançamento e adensamento

No transporte dos concretos leves, deve-se considerar sua tendência à segregação, em função dos baixos valores da massa específica dos agregados. Este fenômeno pode ser evitado ou reduzido, com a dosagem de concretos com coesão e consistência adequados, controlando-se a relação água/cimento e o teor dos agregados miúdos e com a utilização de adições minerais, como a sílica ativa.

Para o bombeamento do concreto leve, a umidade e a granulometria dos agregados leves assumem grande importância. O pré-umidecimento do agregado leve mostra-se importante para prevenir a perda brusca de trabalhabilidade no estado fresco, que pode provocar o entupimento dos dutos durante o lançamento. Recomenda-se, ainda, que o agregado miúdo tenha altos teores de partículas com diâmetro inferior a 0,3 mm (EUROLIGHTCON, 2000b)

Em decorrência dos menores valores da massa específica dos concretos leves, os esforços transmitidos às formas, durante o lançamento, são inferiores aos observados para os concretos tradicionais. Em contrapartida, devem ser considerados o aumento dos esforços e deformações nas formas durante o adensamento, pois normalmente os concretos leves exigem maior energia de vibração do que os concretos tradicionais.

Normalmente, podem-se adotar, para os concretos leves, as técnicas usuais de adensamento, entretanto esses concretos exigem uma energia maior de vibração do que os concretos tradicionais. No caso específico dos vibradores de imersão, o raio de ação

destes é adotado como a metade dos utilizados nos concretos tradicionais. Como a energia de vibração utilizada nos concretos leves deve ser maior do que a utilizada para os concretos tradicionais, os concretos leves devem apresentar coesão adequada para evitar a segregação (CEB/FIP, 1977; HOLM e BREMNER, 2000).

Há também a possibilidade da utilização de concretos leves auto-adensáveis, como apresentado no estudo de YANAI et al. (2000).

O correto adensamento dos concretos leves mostra-se importante também para evitar a formação de vazios ao redor do agregado leve, provocado pelo acúmulo de pequenas bolhas de ar expulsas do agregado durante o processo de absorção de água, como pode ser observado na Figura 1.6.

1.5.3. Cura

Segundo HOLM e BREMNER (1994), pode-se adotar o mesmo processo de cura dos concretos convencionais para os concretos com agregados leves, tomando-se cuidados especiais com a temperatura do concreto.

O calor liberado durante o processo de hidratação do cimento acarreta uma elevação maior na temperatura dos concretos leves do que nos concretos convencionais, em função da baixa condutibilidade térmica dos agregados leves. Para evitar a formação de fissuras térmicas, em ambientes com baixas temperaturas, recomenda-se protelar a retiradas das formas, ou cobrir o concreto com mantas isolantes. Quando for utilizado o processo de cura térmica, deve-se adotar um período maior de cura ou uma velocidade de elevação de temperatura menor (EUROLIGHTCON, 1998).

Por outro lado, o agregado leve beneficia o processo de hidratação do cimento, pois, durante o processo de mistura dos materiais, retém uma parcela de água que será transferida para a matriz de cimento ao longo do período de hidratação, garantindo assim a presença de parte da água necessária para as reações químicas desse processo, independentemente do rigor das condições ambientais externas. Esse fenômeno, denominado “cura interna”, segundo AL-KHAIAT e HAQUE (1998), torna os concretos leves menos sensíveis às variações do processo de cura nas idades iniciais.

1.6. Trabalhabilidade dos concretos leves no estado fresco

As propriedades dos concretos leves no estado fresco e os fatores que as afetam são essencialmente os mesmos observados nos concretos tradicionais. Entretanto, devido à baixa massa específica e à alta absorção de água dos agregados leves, as propriedades relacionadas à trabalhabilidade dos concretos leves necessitam de uma atenção especial.

A trabalhabilidade do concreto pode ser definida como a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco, com perda mínima de homogeneidade. O termo manipular inclui as operações das primeiras idades como lançamento, adensamento e acabamento. Considera-se o índice de consistência, medido pelo abatimento do tronco de cone ou pela mesa de espalhamento, um dos parâmetros mais adequados para a verificação das características associadas à trabalhabilidade dos concretos no estado fresco (ASTM C 125, 1993; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A faixa de variação dos valores para o índice de consistência dos concretos leves, normalmente, mostra-se menor do que a utilizada para os concretos tradicionais. Os concretos leves com altos valores de índice de consistência apresentam grandes possibilidades de segregação dos agregados e, por outro lado, concretos leves com baixos valores de índice de consistência apresentam dificuldades no adensamento.

Durante o processo de determinação dos valores do índice de consistência para os concretos leves, devem-se considerar os baixos valores da massa específica dos agregados, que no caso do “slump test”, por exemplo, fará com que os concretos leves apresentem valores de abatimento menores do que os obtidos para os concretos tradicionais, produzidos nas mesmas condições de dosagem, devido essencialmente à diferença dos valores da massa específica dos agregados.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a vibração excessiva, os altos valores de índice de consistência e a baixa coesão são, normalmente, os fatores responsáveis pelo surgimento da segregação e da exsudação nos concretos leves, afetando, desfavoravelmente, a manipulação do material, podendo em alguns casos alterar o desempenho de algumas propriedades no estado endurecido.

A segregação e a exsudação dos concretos leves podem ser evitados ou minimizados tomando-se alguns cuidados no processo de dosagem, como granulometria

adequada dos agregados, substituição total ou parcial do agregado miúdo por areia natural e utilização de adições minerais.

1.7. Propriedades dos concretos leves no estado endurecido

São vários os fatores que influenciam as propriedades dos concretos leves no estado endurecido. Entretanto, neste trabalho, serão analisados apenas os fatores relacionados aos agregados leves, isto é, as alterações provocados nas propriedades dos concretos em função da substituição dos agregados tradicionais por agregados leves.

1.7.1. Resistência à compressão e massa específica

A resistência à compressão e a massa específica são as propriedades mais utilizadas na caracterização dos concretos leves estruturais e estão diretamente relacionadas com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado. A granulometria dos agregados tem mais influência na massa específica e na resistência mecânica dos concretos leves do que nos concretos tradicionais, uma vez que o valor da massa específica dos agregados leves, como é o caso da argila expandida, é inversamente proporcional à sua dimensão.

O valor da massa específica dos concreto leves apresenta variação progressiva, desde sua condição inicial até um estado mais estável, que depende das condições de exposição. Para a estimativa das cargas a ser suportadas pelas formas e escoramentos, recomenda-se utilizar o valor de massa específica do concreto leve no estado fresco e para estimativa do peso próprio deve ser considerada o valor da massa específica do concreto leve seco ao ar, ligeiramente superior à do concreto seco em estufa.

Na análise das propriedades dos concretos leves, deve-se considerar que os agregados apresentam resistência mecânica relativamente baixa e, com isso, a resistência mecânica da matriz de cimento apresenta grande importância na resistência mecânica dos concretos.

Nos concretos leves, utiliza-se, mais eficientemente, a resistência mecânica potencial da matriz de cimento do que nos concretos tradicionais, em função da similaridade entre os valores dos módulos de deformação do agregado e da matriz e da excelente qualidade da zona de transição agregado-matriz. Com isso, os concretos leves, normalmente, não rompem devido à diferença entre as deformações dos agregados e da

matriz de cimento, mas, sim, devido ao colapso da argamassa, que, normalmente, ocorre na região ao redor do agregado. No colapso dos concretos leves, a linha de fratura atravessa os agregados, como ocorre nos concretos de alta resistência com massa específica normal, diferentemente do que ocorre nos concretos tradicionais, em que a ruptura do material ocorre pelo colapso da argamassa e a separação entre as fases, resultando uma linha de fratura ao redor do agregado (ZHANG e GJØRV, 1991a; EUROLIGHTCON, 1998).

Os concretos leves apresentam estabilização dos valores finais de resistência à compressão, mais rapidamente do que os concretos tradicionais. Normalmente, aos 7 dias os concretos leves já apresentam 80% da resistência à compressão observada aos 28 dias de idade (EUROLIGHTCON, 1998).

No presente estado da arte, 102 MPa representa o limite superior de resistência à compressão para concretos leves. Este valor foi obtido por ZHANG e GJØRV (1991a) para concretos leves com massa específica de 1735 kg/m^3 , o que representa um fator de eficiência de $58,7 \text{ MPa.dm}^3/\text{kg}$.

Segundo AÏTICIN (2000), existe um limite máximo para o teor de cimento que pode ser utilizado para aumentar o valor da resistência à compressão do concreto leve. Quando se atinge esse limite, o agregado leve mostra-se como o material determinante na resistência à compressão do concreto e o aumento da resistência à compressão da pasta de cimento já não contribui para o aumento da resistência à compressão do concreto. Ainda segundo este pesquisador, o consumo de cimento dos concretos leves de alto desempenho normalmente variam entre 400 e 600 kg/m^3 .

Nos estudos realizados por MALHOTRA (1990), observou-se que o uso de cimento de alta resistência inicial possibilitou a obtenção de concretos leves, com valores de resistência à compressão mais altos do que os observados para os outros tipos de cimento, tanto nas idades iniciais como em idades avançadas.

Segundo diversos estudos apresentados no relatório do EUROLIGHTCON (1998), após os 28 dias de idade, os concretos leves apresentam baixa elevação dos valores de resistência à compressão, comparativamente aos concretos tradicionais. Esse efeito pode ser atribuído à baixa resistência mecânica dos agregados leves, principal limitante da resistência mecânica dos concreto leves.

Nos resultados do estudo realizado por EVANGELISTA et al. (1996), em que foram analisados concretos leves com argila expandida nacional, podem-se observar as relações entre a resistência à compressão e a massa específica do concreto leve (Figura 1.7) e entre a resistência à compressão do concreto leve e a dimensão máxima característica do agregado leve (Figura 1.8). Nesse estudo, foram utilizados agregados com dimensão máxima característica de 9,5 e 12,5 mm e o consumo de cimento dos concretos leves foi de 500 kg/m³.

FIGURA 1.7. Relação entre resistência à compressão a massa específica do concreto leve com argila expandida nacional (Fonte: EVANGELISTA et al., 1996)

FIGURA 1.8. Relação entre resistência à compressão do concreto leve e a dimensão máxima característica do agregado leve nacional (Fonte: EVANGELISTA et al., 1996)

Um outro exemplo da relação entre a resistência à compressão e a massa específica dos concretos com agregados leves nacionais pode ser observado no estudo realizado por GOMES NETO (1998), apresentado na Figura 1.9. Nesse estudo, foi utilizado agregado leve nacional com dimensão máxima característica de 6,3 mm e o consumo de cimento dos concretos leves variou entre 450 e 1300 kg/m³.

FIGURA 1.9. Relação entre resistência à compressão a massa específica do concreto leve com argila expandida nacional (Fonte: GOMES NETO, 1998)

1.7.2. Resistência à tração

Segundo o relatório do EUROLIGHTCON (1998), as principais diferenças entre os concretos leves e os tradicionais, com relação a propriedade de resistência à tração, podem ser resumidas em:

- o tipo de fratura. Nos concretos leves, a fratura ocorre através do agregado e não ao redor do agregado, na zona de transição agregado-matriz, como ocorre nos concretos tradicionais;
- o teor de umidade do concreto, que pode ser maior nos concretos leves do que nos tradicionais para as mesmas condições de cura e pode causar uma redução significativa no valor da resistência à tração;
- a resistência á tração na flexão nos concretos leves, é mais afetada do que a resistência à tração na compressão diametral.

Segundo HOLM e BREMNER (1994), os valores da resistência à tração dos concretos leves, tanto na compressão diametral, como na flexão, são ligeiramente inferiores aos observados nos concretos com massa específica normal para o mesmo nível de resistência à compressão, em função do grande volume de vazios dos agregados leves, que pode chegar a 50% do volume total para as argilas expandidas.

A relação entre os valores das resistências à compressão e à tração por compressão diametral dos concretos leves, normalmente, varia entre 5 e 15% para concretos com resistência à compressão acima de 20 MPa e depende, essencialmente, da qualidade do concreto. Em estudo realizado por CURCIO et al. (1998) apud EUROLIGHTCON (1998), com concretos leves de alto desempenho, foi observado valores de resistência à tração na compressão diametral, variando entre 6 e 6,5% do valor da resistência à compressão. Neste mesmo estudo, foram observados também, valores de resistência à tração na flexão dos concretos leves, variando entre 9,8 e 10,5% da resistência à compressão.

A Tabela 1.4 apresenta algumas expressões de documentos normativos internacionais para a estimativa dos valores das resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos leves em função da resistência à compressão. Analisando essas relações, observa-se que para os concretos leves com resistência à compressão variando entre 20 e 50 MPa, a relação entre os valores da resistência à tração na compressão diametral e da resistência à compressão varia entre 6 e 10% e que a relação entre os valores da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão varia entre 7,5 e 12%. Observa-se, também, a redução dos valores das relações entre os valores das resistências à tração e à compressão com o aumento dos valores da resistência à compressão dos concretos leves.

Para o caso específico dos concretos produzidos com agregados leves nacionais, observam-se valores de resistência à tração por compressão diametral variando entre 6 e 9% da resistência à compressão (TEZUKA, 1973; EVANGELISTA et al., 1996; GOMES NETO, 1998).

TABELA 1.4. Relações entre a resistência à compressão e as resistências à tração por compressão diametral e à tração na flexão dos concretos leves

Referência	Resistência à tração (MPa)		Observações
	Compressão diametral (f_{tD})	Flexão (f_{ctM})	
SLATE et al. (1986)	$0,42.f_c^{0,5}$	$0,54.f_c^{0,5}$	$62 \geq f_c \geq 21$ Apenas agregado leve
ZHANG e GJØRV (1991a)	$0,23.f_{cu}^{0,67}$	$0,73.f_{cu}^{0,5}$	-
HOFF (1991)	$0,49.f_c^{0,5}$	-	-
CEB/FIP (1977)	$0,23.f_{cu}^{0,67}$	$0,46.f_{cu}^{0,67}$	-
ACI 318 (1992)	$0,42.f_c^{0,5}$	$0,46.f_c^{0,5}$	Apenas agregado leve
ACI 318 (1992)	$0,48.f_c^{0,5}$	$0,53.f_c^{0,5}$	Areia e agregado leve

f_c = Resist. à compressão em corpos-de-prova cilíndricos (MPa);

f_{cu} = Resist. à compressão em corpos-de-prova cúbicos (MPa).

1.7.3. Módulo de deformação

Assim como a maioria das propriedades dos concretos leves, o módulo de deformação está diretamente relacionado com o tipo e com a quantidade de agregado leve utilizado. O valor do módulo de deformação dos concretos depende dos valores do módulo de deformação dos componentes individuais, do proporcionamento entre os materiais e da qualidade da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento. Como no concreto leve utilizam-se altos teores de agregados leves, que apresentam valores de módulo de deformação significativamente inferiores aos observados nos agregados tradicionais, esse tipo de concreto apresenta valores de módulo de deformação inferiores aos observados nos concretos tradicionais.

Segundo o CEB/FIP (1977), normalmente, o valor do módulo de deformação do concreto leve varia entre 30 e 70% do valor do módulo de deformação do concreto com massa específica normal, para um mesmo nível de resistência à compressão.

Segundo SMEPLASS (1992) apud EUROLIGHTCON (1998), para concretos leves com resistência à compressão acima de 60 MPa o valor do módulo de deformação mostra-se cerca de 20 a 30% inferior ao observado nos concretos com agregados tradicionais, para o mesmo nível de resistência.

Em estudos realizados por ZHANG & GJØRV (1991a), observou-se que o módulo de deformação do concreto leve está diretamente relacionado com a resistência e com a quantidade de agregado, assim como com a qualidade da zona de transição agregado-matriz.

Segundo o CEB/FIP (1977), quanto mais próximos forem os valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento, melhor será o comportamento do concreto no regime elástico.

A Tabela 1.5 apresenta algumas expressões mencionadas em documentos normativos internacionais que relacionam o módulo de deformação do concreto leve com sua respectiva resistência à compressão e massa específica. A Figura 1.10 apresenta a relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão dos concretos leves estruturais, segundo o ACI (1997).

TABELA 1.5. Equações para cálculo do módulo de deformação

<i>Referência</i>	<i>Equação *</i>	<i>Observações</i>
NS 3473 (1992)	$E_c = 9.5 \cdot f_{cck}^{0.3} \cdot (\gamma / 2400)^{1.5}$ [GPa]	$f_{cck} < 85$ Mpa
ACI 318 (1992)	$E_c = 0,043 \cdot \gamma^{1.5} \cdot f_c^{0.5}$ [MPa]	$f_c < 41$ Mpa
BS 8110 Part.2 (1985)	$E_c = 1,7 \cdot (\gamma / 1000)^2 \cdot f_{ck}^{0.3}$ [GPa]	-
CEB (1978)	$E_c = 1,6 \cdot \gamma^2 \cdot (f_{cck} + 8)^{0.33} \cdot 10^{-6}$ [GPa]	-

* E_c = módulo de deformação; γ = massa específica (kg/m³); f_c = res. compressão (150 x 300 mm - cilíndrico); f_{cck} = res. compressão (100 x 200 mm - cilíndrico); f_{ck} = res. compressão (cubo - 100 mm).

A expressão do ACI 318 (1992), Tabela 1.5, que relaciona o módulo de deformação do concreto leve com a resistência à compressão e a massa específica mostra-se bastante adequada para a estimativa do valor do módulo de deformação dos concretos com agregado leve nacional, conforme os estudos realizados por TEZUKA (1973), ARMELIN et al. (1994), EVANGELISTA et al. (1996) e GOMES NETO (1998).

FIGURA 1.10. Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão dos concretos leves estruturais (ACI, 1997)

1.7.4. Comportamento da curva tensão-deformação

A curva tensão-deformação dos concretos leves, normalmente, é caracterizada por apresentar maior linearidade do trecho ascendente, maior valor da deformação última e maior inclinação no trecho descendente da curva após a ruptura, quando comparada à observada para o concreto tradicional. Essas características podem ser atribuídas à maior compatibilidade entre os valores do módulo de deformação da matriz de cimento e do agregado e a melhoria da qualidade da matriz de cimento na zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento (GRIMER e HEWITT, 1969; AİTCIN, 2000).

Nos concretos tradicionais, a formação e a propagação de microfissuras, cuja origem principal é atribuída à concentração de tensões, em função da diferença entre os valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento, são consideradas as principais causas do colapso do concreto e pelo comportamento não linear da curva tensão-deformação, particularmente, próximo à região da tensão de ruptura.

Em estudos realizados por ZHANG e GJØRV (1991a), observou-se que a parte ascendente da curva tensão-deformação dos concretos leves torna-se mais linear à medida que a resistência do concreto cresce, enquanto a parte descendente da curva, após a ruptura, torna-se mais íngreme. Estes autores fazem ainda algumas observações importantes:

- a deformação última decresce com o aumento do consumo de cimento;
- observa-se uma curva tensão-deformação mais linear para os concretos com sílica ativa, comparados aos concretos sem sílica ativa, provavelmente devido a melhoria de desempenho da zona interfacial entre o agregado e a matriz de cimento;
- o efeito da substituição parcial do agregado leve miúdo pela areia natural não influi no comportamento da curva tensão-deformação;
- o comportamento da curva tensão-deformação depende muito das propriedades dos agregados leves, pois houve grande variação do comportamento da curva para os diversos tipos de agregados utilizados.

A Figura 1.11 apresenta uma representação esquemática do comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves segundo sua classe de resistência à compressão, segundo CARRASQUILLO et al. (1981).

FIGURA 1.11. Comportamento da curva tensão-deformação dos concretos leves segundo estudo realizado por CARRASQUILLO et al. (1981)

1.7.5. Permeabilidade

A durabilidade dos concretos depende essencialmente da permeabilidade deste material. Tem-se, no excesso de água livre, a principal causa dos poros capilares dos

concretos, responsáveis por sua porosidade permeável. Além disso, a permeabilidade dos concretos depende, também, da ocorrência de fissuras internas, ocasionadas, principalmente, pela concentração de tensões devido a diferença dos valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento (CEB/FIP, 1977; HOLM e BRENMER, 1994).

No caso dos concretos leves, os agregados podem apresentar grande influência na permeabilidade dos concretos caso apresentem a estrutura porosa comunicante, pois este fato facilita o fluxo de líquido e gases e consequentemente de agentes agressivos no concreto. Alguns agregados leves, como a argila expandida, apesar de apresentarem valores de porosidade acima de 50%, apresentam baixa permeabilidade, pois a grande maioria dos poros não são interligados, não criando, assim, caminhos preferenciais (HOLM e BRENMER, 1994; SOBRAL, 1996).

Segundo HOLM e BRENMER (1994) e ZHANG e GJØRV (1991c), de forma geral, os concretos leves estruturais apresentam permeabilidade à líquidos e gases semelhante ou inferior à observada nos concretos tradicionais, para o mesmo nível de resistência à compressão. Estes resultados podem ser atribuídos aos baixos valores da relação água/aglomerante dos concretos leves, em relação aos concretos tradicionais, para se obter a mesma resistência à compressão, à diminuição das fissuras internas do concreto leve pela maior proximidade dos valores dos módulos de deformação do agregado e da matriz de cimento e à melhoria da qualidade da matriz, na zona de transição agregado-matriz

Segundo BREMNER (1998), a distribuição uniforme das tensões internas dos concretos leves reduz a formação das fissuras microscópicas, resultando em uma curva tensão-deformação linear até, pelo menos, 80% do carregamento último. Isso significa que a permeabilidade do concreto leve começa a aumentar a cerca de 80% do carregamento último, ao invés de 60%, como normalmente ocorre no concreto com massa específica normal.

1.7.6. Resistência à penetração de cloretos

Um dos principais problemas associados à durabilidade do concreto armado exposto em ambiente marinho está relacionado com a corrosão da armadura pela ação de íons cloreto que penetram no concreto. A velocidade e a quantidade de íons cloreto

que penetram no concreto dependem, essencialmente, das propriedades da matriz de cimento. Com isso, os concretos leves e os concretos tradicionais apresentam características similares com relação a resistência à penetração de íons cloreto.

Nos estudos realizados por HAMMER et al. (1995) apud EUROLIGHTCON (1998), foram observados valores semelhantes de difusão de íons cloreto em concretos produzidos com vários tipos de agregados leves, demonstrando, assim, a baixa influência do agregado na resistência do concreto leve à penetração e difusão de íons cloretos.

1.7.7. Carbonatação

Para o mesmo nível de resistência à compressão, os concretos leves normalmente apresentam valores da relação água/aglomerante menores do que os apresentados pelos concretos tradicionais. Com isso, os concretos leves apresentam uma matriz de cimento com porosidade reduzida, em relação aos concretos tradicionais, reduzindo, assim, a ação da carbonatação (EUROLIGHTCON, 1998).

Uma avaliação realizada por HOLM e BREMNER (1994) em embarcações produzidas com concreto leve durante a Primeira Guerra Mundial, demonstrou que, após oito décadas, os concretos leves apresentavam espessura média de carbonatação de 2 mm e não apresentavam carbonatação na interface entre o concreto e a armadura.

Um estudo realizado no Japão demonstrou, também, que concretos leves com 19 anos de idade apresentaram profundidade de carbonatação similar à apresentada pelos concretos tradicionais, produzidos nas mesmas condições de dosagem (OCHUCHI et al., 1984 apud EUROLIGHTCON, 1998).

1.7.8. Resistência à abrasão

Segundo o CEB/FIP (1977), a resistência à abrasão do concreto depende essencialmente das resistências da matriz de cimento e do agregado e da aderência entre eles. No caso dos concretos leves, enquanto o agregado não estiver exposto à solicitação de abrasão, estes apresentam valores de resistência à abrasão semelhante aos concretos com massa específica normal, para o mesmo nível de resistência à compressão. Entretanto caso haja exposição do agregado, o concreto leve apresentará baixa resistência à abrasão.

1.7.9. Retração por secagem

A retração dos concretos tem como causa principal a mudança de volume da pasta de cimento e está diretamente relacionada com o tipo de agregado e a quantidade e a qualidade do cimento utilizado.

Normalmente, os concretos leves apresentam valores de retração por secagem maiores do que os obtidos para os concretos tradicionais, para o mesmo nível de resistência à compressão, uma vez que o agregado leve oferece baixa restrição à retração da pasta de cimento, em função dos baixos valores do módulo de deformação em comparação aos agregados tradicionais (CEB/FIP, 1977; SOBRAL, 1996).

A NM 35/95 limita a retração por secagem do concreto leve em 0,10%, para misturas de referência preparadas na proporção de 1:6, sendo uma parte de cimento e seis de agregado leve, medidos em volume.

A Figura 1.12 apresenta a faixa de valores normalmente observados de retração por secagem para concretos leves (HOFF, 1991).

FIGURA 1.12. Faixa de variação dos valores de retração por secagem dos concretos leves (Fonte: HOFF, 1991)

1.7.10. Fluência

Normalmente, os valores de fluência apresentados pelos concretos leves são maiores do que os observados nos concretos tradicionais e podem provocar reduções significativas dos valores da resistência à compressão. Segundo estudo realizado por SMEPLASS (1997b) apud EUROLIGHTCON (1998), corpos-de-prova de concreto

leve submetidos à solicitação de compressão por um longo período apresentaram redução de 20% do valor da resistência à compressão observada aos 28 dias.

1.7.11. Propriedades térmicas e resistência ao fogo

As propriedades térmicas dos concretos leves são significativamente diferentes das observadas nos concretos tradicionais. O ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves reduz a transferência e a absorção de calor em relação aos agregados tradicionais, alterando assim as propriedades térmicas dos concretos, como por exemplo a redução da condutividade térmica. Por esta razão, algumas edificações utilizam o concreto leve na vedação das fachadas e na cobertura para reduzir a absorção e a transferência para o ambiente interno do calor proveniente da radiação solar (CEB/FIP, 1977; EUROLIGHTCON, 1998; HOLM e BREMNER, 2000).

A Tabela 1.6 apresenta uma comparação entre os valores de condutividade térmica, expansão térmica, difusão térmica e calor específico entre o concreto leve e o concreto tradicional.

TABELA 1.6. Propriedades térmicas dos concretos leves

<i>Propriedades</i>	<i>Concreto leve</i>	<i>Concreto normal</i>
Massa específica (kg/m ³)	1850	2400
Resistência à compressão (MPa)	20 - 50	20 – 70
Calor específico (cal/g.°C)	0,23	0,22
Condutividade térmica (W/m.K)	0,58 - 0,86	1,4 – 2,9
Difusão térmica (m ² /h)	0,0015	0,0025 – 0,0079
Expansão térmica (microstrain .10 ⁻⁶ /°C)	9	11

(Fonte: HOLM e BREMNER, 2000)

Os concretos leves geralmente apresentam maior resistência ao fogo do que os concretos tradicionais. Esta performance superior dos concretos leves pode ser atribuída à combinação dos seguintes fatores: menor condutividade térmica, menor coeficiente de expansão térmica e maior estabilidade dos agregados leves quando expostos a altas temperaturas (EUROLIGHTCON, 1998; NOUMOWÉ et al., 2000).

Em um estudo comparativo entre os concretos leves, com características semelhantes aos concretos utilizados nesta pesquisa, e os concretos tradicionais, realizado por TORRES (2002), observou-se que os concretos leves apresentaram desempenho superior de manutenção da resistência mecânica quando submetidos a altas temperaturas (800°C).

1.8. Zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento

Segundo MONTEIRO (1993), antes que qualquer trabalho sistemático seja feito para controlar a microestrutura da matriz de cimento, visando a melhoria das propriedades do concreto, é importante que sejam realizados estudos que abordem a melhoria da microestrutura da zona de transição que existe entre o agregado e a matriz de cimento, uma vez que muitas propriedades importantes do concreto, tais como durabilidade e resistência mecânica, são significativamente influenciadas pelas características dessa zona de transição.

Segundo MASO (1996), existe uma forte relação entre a espessura e qualidade da zona de transição e as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos. A zona de transição influencia, diretamente, as propriedades relacionadas à resistência mecânica, módulo de deformação, mecanismo de propagação de fissuras e permeabilidade de agentes agressivos nos concretos, demonstrando, assim, a grande importância do estudo da zona de transição agregado-matriz dos concretos.

Os principais desenvolvimentos da microestrutura da zona de transição desde a mistura dos materiais constituintes do concreto podem ser resumidas da seguinte forma: inicialmente, no concreto fresco, filmes de água envolvem os agregados pelo efeito parede, originando uma relação água/cimento superior na região próxima ao agregado, em comparação àquela existente na matriz de cimento; em seguida, íons produzidos pela dissolução de vários componentes do cimento se combinam para formar etringita, hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado; devido à maior relação água/cimento, os produtos cristalinos na vizinhança dos agregados são caracterizados por cristais maiores e, assim, formam uma estrutura mais porosa e mais rica em hidróxido de cálcio e etringita do que a observada na matriz de cimento (PAULON, 1991; MONTEIRO, 1993; OLLIVIER et al., 1995).

A resistência da pasta de cimento depende, essencialmente, das forças de atração de Van der Waals, ou seja, a resistência será maior quanto mais compacta for a pasta e quanto menos cristalinos forem os produtos de hidratação. Dessa forma, a zona de transição apresenta resistência mais baixa do que a da matriz de cimento, sendo, assim, a região do concreto mais vulnerável à microfissuração, que influencia negativamente algumas propriedades deste material, como a permeabilidade e a resistência mecânica.

A vulnerabilidade da zona de transição à microfissuração existe tanto nos períodos iniciais da hidratação (quando o concreto é submetido a tensões de tração induzidas pela retração por secagem e por variações térmicas), quanto no estado endurecido do concreto (pela ação dos carregamentos externos), devido a deformações diferenciais entre a matriz de cimento e o agregado, que facilmente excedem a resistência da zona de transição, causando, assim, a microfissuração. Como os cristais de hidróxido de cálcio tendem a se precipitar em camadas preferenciais e apresentam pouca aderência, as microfissuras tendem a se formar rapidamente, numa direção paralela às camadas (MONTEIRO, 1993; METHA e MONTEIRO, 1994; MASO, 1996).

Dessa forma, pode-se resumir que os fatores que mais influem na baixa resistência da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento são os grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados preferencialmente, o grande volume de vazios e a presença de microfissuras.

A estrutura da zona de transição pode ser alterada e densificada de diversas formas. Dentre estas, a mais utilizada e efetiva mostra-se por meio da incorporação de adições minerais, contribuindo assim para um melhor desempenho das propriedades dos concretos.

Algumas pesquisas apresentam resultados demonstrando que as adições minerais são capazes de produzir uma significativa redução da espessura da zona de transição agregado-matriz, contribuindo, dessa forma, para a melhoria das propriedades relacionadas a resistência e durabilidade do sistema matriz-agregado (PAULON, 1991; MONTEIRO, 1993; KOBAYASHI et al., 1998; KJELSEN et al., 1998).

A redução da espessura da zona de transição com a utilização de adições minerais pode ser explicada por diversos fatores: menor permeabilidade do concreto

fresco, causando assim menor acúmulo de água de exudação na superfície do agregado; presença de vários núcleos de cristalização que contribuem para a formação de cristais menores de hidróxido de cálcio e com menor tendência de cristalização em orientações preferenciais; e a gradual densificação do sistema dos produtos de hidratação através de ações pozolânicas lentas entre o hidróxido de cálcio e a adição mineral; (BENTUR e COHEN, 1987; SCRIVENER et al., 1988; ALMEIDA, 1996).

Segundo diversos estudos (AQUINO et al., 1995; BENTUR e ODLER, 1996; AİTCİN, 2000), considera-se a sílica ativa uma adição mineral bastante efetiva na redução da espessura da zona de transição agregado-matriz, como pode ser observado nos resultados obtidos por MONTEIRO e METHA (1986, 1988), nos quais se verificou que a espessura da zona de transição variou de 50 μm , para concreto sem adições minerais, para valores inferiores à 10 μm , em concretos com sílica ativa.

Outro fator importante que influencia a estrutura e a espessura da zona de transição agregado-matriz é o tipo de agregado. Estudos recentes sobre a microestrutura de concretos com agregados leves demonstraram que a interação entre este tipo de agregado e a matriz de cimento é diferente da ocorrida nos concretos com agregados tradicionais (WASSERMAN e BENTUR, 1996, 1997, 1998; CHEN e SCHNEIDER, 1998; VIEIRA, 2000).

A natureza da interação entre o agregado leve e a matriz de cimento depende essencialmente do teor de umidade e da porosidade da camada externa do agregado. Quando os agregados leves utilizados forem previamente saturados ou apresentarem uma camada externa densa, com baixa porosidade permeável, a natureza da zona de transição será muito próxima da observada nos concretos com agregados tradicionais. Entretanto, para agregados leves com uma certa quantidade de porosidade permeável na face externa, ocorre uma redução da espessura da zona de transição, em função da redução da relação água/cimento da matriz nessa região, ocasionada pela absorção de água do agregado, efeito denominado, por alguns pesquisadores, “filtragem” ou “densificação”. A diminuição da espessura da zona de transição agregado-matriz pode ser atribuída, também, à redução do efeito parede nos agregados leves, normalmente mais rugosos e porosos do que os agregados tradicionais (HOLM et al., 1984; ZHANG e GJØRV, 1990a; ZHANG e GJØRV, 1990b; SARKAR et al., 1992; ZHANG e GJØRV, 1992; LO et al., 1999; VIEIRA, 2000).

Segundo ZHANG e GJØRV (1990a, 1990b) e WASSERMAN e BENTUR (1996), a interface entre o agregado leve e a matriz de cimento apresenta baixa porosidade e caracteriza-se pela alta ancoragem mecânica entre o agregado leve e a matriz de cimento, consequência da rugosidade da superfície do agregado. Nestes estudos observou-se também que os agregados leves produzidos em forno rotativo utilizando argila (argila expandida), não apresentam potencial de reação pozolânica com a matriz de cimento.

Estudos realizados por FAGERLUND (1972) sugerem que a qualidade da matriz de cimento ao redor do agregado leve, na zona de transição, apresenta melhoria de desempenho em relação ao agregado tradicional devido ao efeito de filtragem, em que o agregado leve absorve parte da água presente na pasta de cimento, reduzindo assim, a relação água/cimento da matriz de cimento próxima à superfície do agregado leve. Esse fato diminui a permeabilidade e aumenta a resistência mecânica da matriz de cimento na zona de transição agregado-matriz.

Nos estudos realizados por KHOKHRIN (1973) sobre a interface entre o agregado leve e a matriz de cimento, utilizando técnicas de análise da resistência à compressão em regiões particulares do concreto leve, observou-se que, nos concretos estudados, a zona de transição agregado-matriz apresentou resistência à compressão entre 9 e 15 MPa, enquanto a matriz de cimento apresentou valores variando entre 6 e 8 MPa.

BREMNER et al. (1984) examinaram várias estruturas de concreto com agregados leves expostas em ambientes agressivos há mais de 60 anos e verificaram que o agregado leve apresentava boa aderência à matriz e que a quantidade de silício (Si) presente na interface agregado-matriz era maior do que a presente na matriz de cimento.

A espessura e a qualidade da matriz de cimento na zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento têm grande influência nas propriedades dos concretos leves, como pôde ser observado nos estudos anteriormente apresentados, assim como nos realizados por SARKAR et al. (1992) e WASSERMAN e BENTUR (1996). Observou-se nesses estudos que a redução da espessura da zona de transição agregado-matriz melhora as propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos leves, demonstrando, assim, a grande importância do estudo da zona de transição agregado-matriz nos concreto leves.

1.9. Aplicações dos concretos leves

Nos últimos anos tem-se observado a aplicação do concreto leve de alto desempenho nos mais diversos tipos de estruturas, tais como plataformas marítimas, pontes, recuperação estrutural e edifícios de múltiplos andares. Deve-se salientar que essas estruturas estão expostas aos mais variados ambientes, sendo, alguns, extremamente agressivos, demonstrando, assim, a grande versatilidade e durabilidade deste material.

Nos últimos trinta anos, observa-se um expressivo aumento da aplicação dos concretos leves em ambientes marítimos, como pontes e plataformas petrolíferas (PHILEO, 1986; SEABROOK e WILSON, 1988; MAYS e BARNES, 1991; LAAMANEN, 1993; MELBY et al., 1996).

Dentre estes tipos de construções, destacam-se as plataformas marítimas flutuantes, construídas em doca seca e, posteriormente, transportadas para o local de implantação, como a plataforma South Arne (Figura 1.13), construída em 1999 na Dinamarca. O concreto leve apresenta melhoria das características de flutuação desse tipo de estrutura durante o transporte e a utilização, em comparação aos concretos tradicionais. A Tabela 1.7 apresenta alguns exemplos de estruturas marítimas produzidas com concreto leve.

FIGURA 1.13. Plataforma petrolífera South Arne

A construção integral ou parcial e a recuperação de pontes utilizando concretos leves também se mostram como importantes aplicações deste tipo de concreto, nos últimos anos. Este fato se deve, principalmente, à diminuição do peso próprio, reduzindo, assim, as cargas nas fundações e os esforços na estrutura. Um exemplo da versatilidade dos concretos leves nas construções de pontes pode ser observada na ponte NordHorland, construída na Noruega, em 1999, com elementos pré-moldados apoiados

em caixões flutuantes, ambos executados em concreto leve, com 1400 metros de comprimento (Figura 1.14). A Tabela 1.8 apresenta alguns exemplos de pontes produzidas com concreto leve.

TABELA 1.7. Obras marítimas produzidas com concreto leve

<i>Função</i>	<i>Denominação</i>	<i>Local</i>	<i>Ano</i>	γ (kg/m ³)	f_c (MPa)
Doca flutuante	-	Itália	1972	1870	54
Plataforma flutuante	CIDS	EUA	1984	1840	45
Experimental	-	Noruega	1984	1915	70
Cais Flutuante	Snorre	Noruega	1991	1950	65
Plataforma petrolífera	Heidrun TLP	Noruega	1995	1950	70
Plataforma petrolífera	Troll GBS	Noruega	1995	1950	65
Tanque	BP	Escócia	1996	1875	54
Plataforma petrolífera	South Arne	Dinamarca	1999	1850	62

Estrutura flutuante

Vista geral

FIGURA 1.14. Ponte flutuante Nordhordland

A execução de novos tabuleiros em pontes existentes, utilizando concreto leve, reduz as cargas na estrutura e possibilita o alargamento das vias de rodagem. Dois exemplos recentes de utilização de concreto leve na recuperação de pontes existentes são a ponte 25 de Abril em Lisboa, Portugal, e a Brooklyn Bridge em Nova York, EUA, apresentadas, respectivamente, nas Figuras 1.15a e 1.15b.

Os concretos leves têm grande aplicação, também, na construção de edifícios de múltiplos andares moldados *in loco*. Segundo estudos realizados pelo CEB/FIP (1977), estruturas de concreto leve com massa específica em torno de 1500 kg/m³ apresentam redução do custo da fundação da ordem de 30%, comparadas às estruturas com concreto

com massa específica normal. A redução das cargas na fundação se torna ainda mais vantajosa em locais com solo de baixa resistência.

TABELA 1.8. Pontes produzidas com concreto leve

<i>Tipo</i>	<i>Denominação</i>	<i>Local</i>	<i>Ano</i>	<i>Maior vão (m)</i>	γ (kg/m ³)	f_c (MPa)
Avanços	Chesapeake Bay	EUA	1952	488	1680	24
Avanços	Dyckerhoff	Alemanha	1967	96	1610	39
Avanços	Friarton	Escócia	1978	174	1750	38
Flutuante	Bergsøysund	Noruega	1992	835	1900	55
Vigada	Eidsvoll Sundbru	Noruega	1992	40	-	55
Avanços	Støvset	Noruega	1994	220	1900	58
Tirantes e flutuante	Nordhorland	Noruega	1994	172	1900	55
Pré-moldada	Wabash River	EUA	1994	60	-	48
Tirantes	Grenland	Noruega	1996	305	1890	60
Avanços	Stolma	Noruega	2000	301	1940	70
Avanços	Benicia-Martinez	EUA	2001	200	-	45

(a)

(b)

FIGURA 1.15. Pontes recuperadas utilizando concreto leve
(a) Ponte 25 de Abril e (b) Brooklyn Bridge

Na construção de edifícios de múltiplos andares, além do reduzir as cargas da fundação, os concretos leves apresentam melhoria de desempenho térmico e de resistência ao fogo, quando comparado ao concreto tradicional. Como exemplos recentes de edificações que utilizaram o concreto leve na estrutura, pode-se citar o Library Tower (Figura 1.16a), construído em 1990 com 310 m de altura, o edifício Nationsbank (Figura 1.16b), construído em 1994 com 250 m de altura e que utilizou

concreto leve bombeado em toda a estrutura, e o Museu Guggenheim de Bilbao (Figura 1.16c), construído em 1997 onde foram utilizados mais de 4400 m³ de concreto leve na execução das lajes. A Tabela 1.9 apresenta outros exemplos de edificações de múltiplos andares construídos utilizando concreto leve.

(a) (b) (c)
FIGURA 1.16. Edifícios construídos com concreto leve
(a) Library Tower, (b) Edifício Nationsbank e (c) Museu Guggenheim-Bilbao

Entretanto MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que a produção de elementos pré-fabricados se mostra como a aplicação mais vantajosa do concreto leve em todo o mundo, considerando-se os menores custos de manuseio, transporte e montagem. Segundo estes pesquisadores, painéis pré-fabricados de vedação são uma das aplicações mais utilizadas e mais econômicas dos concretos leves.

Nos estudos realizados por CEB/FIP (1977), DALY (2000) e HOLM e BREMNER (2000), observou-se que as estruturas moldadas *in-loco* com concreto leve mostram-se, em média, de 5 a 10% mais baratas do que as executadas com concreto tradicional, ao passo que em pontes de grande comprimento, também moldadas *in-loco*, a redução de custos pode chegar a 15% do valor da obra. Com a utilização da tecnologia da pré-fabricação, observou-se que os valores da redução de custos apresentados podem dobrar, demonstrando, assim, o grande potencial de utilização dos pré-fabricados com concreto leve.

TABELA 1.9. Edifícios construídos com concreto leve

<i>Denominação</i>	<i>Local</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Ano</i>	γ (kg/m ³)	f_c (MPa)
Marina City Towers	Chicaco, EUA	179	1964	1680	25
Australia Square Tower	Sydney, Austrália	184	1967	1750	30
Ikatsu-Ku	Kobe, Japão	-	1969	1750	31
Standard Bank	Johanesburg, África do Sul	130	1970	1950	31
Holly Street City	Londres, Inglaterra	-	1971	1800	28
BMW	Munique, Alemanha	99	1972	1660	41
North Pier Tower	Chicago, EUA	190	1991	1850	44
Picasso Tower	Madrid, Espanha	157	1989	1855	30
Library Tower	Los Angeles, EUA	310	1990	-	28
Nationsbank	Charlotte, EUA	252	1994	1890	47
Kai-Center	Düsseldorf, Alemanha	-	1996	1680	60
Museu Guggenheim	Bilbao, Espanha	-	1997	1700	25
National Hospital	Oslo, Noruega	-	2000	1700	30

O concreto leve, de um modo geral, apresenta um grande potencial de emprego em pré-fabricados considerando-se, em relação aos concretos tradicionais, as seguintes vantagens: redução dos custos de transporte por unidade de volume de concreto, entre 20 e 50%; execução de estruturas com vãos maiores; possibilidade de produzir peças com dimensões maiores, utilizando os mesmos equipamentos da fábrica e do canteiro; e redução do tempo de montagem das estruturas, entre 25 a 50%.

Três importantes exemplos recentes de construções que utilizaram a tecnologia da pré-fabricação com concreto leve, todas finalizadas no ano de 2002, são:

- Chateau on the Lake, em Branson, EUA, onde foram utilizados mais de 1800 elementos pré-fabricados, produzidos em concreto leve com resistência à compressão de 41 MPa e massa específica de 1850 kg/m³. Na cobertura da sala de convenções foram utilizadas vigas duplo-T com 40 m de comprimento (Figura 1.17);
- Wellington Stadium, em Wellington, Nova Zelândia, onde foram produzidos mais de 4000 elementos pré-fabricados, utilizando concreto leve com

resistência à compressão de 35 MPa e massa específica de 1850 kg/m³ (Figura 1.18);

- Recuperação da Ponte James River, em Richmond, EUA. Na recuperação de 102 vãos desta ponte foram utilizados elementos pré-fabricados em concreto leve com resistência à compressão de 35 MPa e massa específica de 1850 kg/m³. A utilização da tecnologia da pré-fabricação possibilitou a realização da recuperação do tabuleiro sem a interrupção do tráfego (Figura 1.19).

FIGURA 1.17. Chateau on the Lake (EUA)

FIGURA 1.18. Wellington Stadium (Nova Zelândia)

FIGURA 1.19 Ponte James River (EUA)

A utilização dos concretos leves nas construções brasileiras mostra-se bastante modesta. Duas obras recentes de destaque, ambas utilizando a tecnologia dos pré-fabricados, são a ampliação do Rio-Centro no Rio de Janeiro em 1996, onde foram utilizados aproximadamente 10.000 m³ de concreto leve, e o novo edifício da Faculdade de Economia e Administração (FEA) da Universidade de São Paulo, em São Paulo.

1.10. Impacto ambiental

A quantificação do impacto ambiental de um material, especialmente de construção, requer um estudo que compreenda a produção do material, processo de construção, conseqüências no projeto estrutural, aspectos de manutenção e reciclagem. Considerando os fatores anteriormente citados, o concreto leve mostra-se um material de baixo impacto ambiental quando comparado a outros materiais de construção (EUROLIGHTCON, 1998).

A Tabela 1.10 apresenta valores do consumo de energia para a produção de alguns materiais de construção. Observa-se que o concreto tradicional, dentre os apresentados, apresenta o maior valor da relação tensão-energia, ou seja, tem o menor consumo de energia para sua produção, em relação à tensão de trabalho.

TABELA 1.10. Valores de consumo de energia para produção de materiais de construção comuns (Fonte: BREMNER, 1998)

<i>Material</i>	<i>Energia p/ volume de material produzido (MJ/m³)</i>	<i>Tensão de trabalho (MPa)</i>	<i>Relação Tensão/Energia (μPa.m³/J)</i>
Concreto tradicional	4.500	14	3.110
Madeira	2.400	7	2.920
Concreto leve	7.500	14	1.870
Aço	57.800	165	285
Plástico rígido	47.300	7	148
Alumínio	981.000	126	128
Vidro	229.000	14	61
Bloco cerâmico	9.000	0.25	22

Em função do alto consumo de energia dos fornos que produzem os agregados leves, o concreto leve apresenta um consumo de energia cerca de 1,6 vezes maior do

que o necessário para produção do concreto tradicional, para a mesma tensão de trabalho. Entretanto a redução da armadura e da energia utilizada no transporte e no processo construtivo com a utilização de concreto leve, facilmente compensam os gastos extras de energia utilizado na produção dos agregados.

1.11. Considerações sobre a aplicação dos concretos leves na produção de elementos esbeltos

De acordo com as informações apresentadas neste capítulo, percebe-se que a substituição dos agregados tradicionais por agregados leves, além de reduzir a massa específica, altera o desempenho de diversas propriedades dos concretos, destacando-se a redução da resistência mecânica, redução do módulo de deformação, aumento da retração por secagem e da fluência, melhoria das propriedades térmicas dos concretos e redução da espessura da zona de transição agregado-matriz. Observou-se, ainda, que os concretos leves apresentam desempenho das propriedades relacionadas à durabilidade semelhante ou superior ao observado para os concretos tradicionais, para os mesmos níveis de resistência à compressão.

Dentre as alterações descritas, algumas contribuem para a adequação dos concretos para a aplicação em elementos pré-fabricados, como a redução da massa específica, maior compatibilidade entre os valores dos módulos de deformação da matriz de cimento e do agregado e melhoria de desempenho das propriedades térmicas. Entretanto algumas alterações podem ser consideradas pouco favoráveis, como a maior possibilidade de segregação dos agregados, redução da resistência mecânica e aumento da retração por secagem e da fluência.

Deve-se, ainda, ressaltar que o concreto utilizado na produção de elementos esbeltos deve apresentar desempenho diferenciado de durabilidade e resistência à tração, em relação aos concretos tradicionais, uma vez que são utilizadas espessuras reduzidas de cobrimento da armadura e esses elementos, geralmente, estão submetidos à solicitação de flexão, como as telhas.

Dessa forma, com a intenção de melhorar o desempenho das propriedades relacionadas à durabilidade e resistência mecânica dos concretos leves, tornando-os ainda mais adequados à produção de elementos esbeltos, e minimizar os efeitos considerados pouco favoráveis, optou-se pela utilização de sílica ativa, aditivo

superplastificante e látex de estireno butadieno (SB) na produção dos concretos, obtendo-se assim o concreto leve de alto desempenho modificado com SB.

No próximo capítulo, faz-se uma abordagem sobre as propriedades dos concretos modificados com SB, bem como uma avaliação sobre os prováveis benefícios da utilização de SB nos concretos leves, visando a adequação deste material à produção de elementos pré-fabricados esbeltos.

2. CONCRETO MODIFICADO COM SB

Neste capítulo, apresenta-se uma discussão sobre as características e as propriedades dos concretos modificados com látex de estireno butadieno (SB), bem como avaliações sobre a influência da utilização do SB nas propriedades dos concretos leves.

2.1. Definição

De forma geral, os polímeros podem ser utilizados para a produção do concreto polímero (ou concreto de resina), concreto impregnado com polímero e concreto modificado com polímero. Este capítulo apresenta uma discussão apenas sobre os concretos modificados com polímero, especificamente sobre os modificados com látex de estireno butadieno (SB)⁴.

2.1.1. Látex

No início da industrialização dos polímeros, em meados do século XIX, a designação de látex estava associada apenas ao polímero de borracha natural. Atualmente, além da designação de borracha natural, utiliza-se o termo látex como sinônimo de adição polimérica sob a forma de emulsão em água e encontra-se frequentemente referido na literatura estrangeira, principalmente na norte-americana, para descrever a emulsão polimérica resultante de uma polimerização por emulsão.

Segundo WALTERS (1987), ACI (1995) e OHAMA (1998), pode-se definir o látex como pequenas partículas de polímero orgânico (diâmetro entre 0,005 e 5µm)

⁴ Informações detalhadas sobre a utilização de polímeros em concretos e argamassas podem ser obtidas em TEZUKA (1979, 1988), OHAMA (1998), WALTERS (1987, 1988), ACI (1995), SILVA (1996), ROSSIGNOLO (1999) e FOWLER (1999).

dispersas em água, normalmente produzidos pelo processo de polimerização por emulsão, originando um fluido leitoso e geralmente de cor branca.

Os principais tipos de látex utilizados em concretos e argamassas de cimento hidráulico são: acetato de polivinil, copolímeros acrílicos, copolímero de estireno acrílico (SA), copolímero de acetato de vinil acrílico, copolímero de acetato vinil etileno (EVA), copolímero de estireno butadieno (SB) e látex de resinas epóxi (TEZUKA, 1988; OHAMA, 1993 e AFRIDI et al., 1995).

2.1.2. Concreto modificado com látex⁵

Segundo TEZUKA (1979, 1988) e ACI (1995), os concretos de cimento Portland modificados com látex são materiais em que o aglomerante é constituído de dois tipos de componentes ativos: o cimento Portland e o monômero ou polímero na forma de dispersão aquosa (látex). Neste tipo de concreto, adiciona-se o látex juntamente com os outros materiais durante o processo de mistura do concreto de cimento Portland. Assim, dentre as formas da utilização de polímeros em concretos, esta apresenta a vantagem de utilizar a mesma tecnologia de produção dos concretos tradicionais.

No mesmo sentido, OHAMA (1987, 1998) afirma que a formação da matriz aglomerante dos concretos modificados com látex se caracteriza pela hidratação do cimento e pela coalescência das partículas de polímero presentes no látex, formando um filme de polímero. Dessa forma, a matriz aglomerante é constituído de duas fases, a matriz de cimento hidratado e o filme polimérico, que preenche parcialmente os vazios da matriz de cimento. Nesse processo, normalmente a hidratação do cimento precede o processo de coalescência do polímero.

2.2. Produção dos concretos modificados com SB

De forma geral, na produção dos concretos modificados com SB podem-se utilizar os mesmos materiais componentes e processos de mistura, transporte e adensamento utilizados para os concretos convencionais.

⁵ Maiores informações sobre o processo de modificação dos concretos com polímero podem ser obtidas em CHANDRA e FLODIN (1987), OHAMA (1987), LARBI e BIJEN (1990) e SU et al. (1996).

Entretanto os concretos modificados com SB apresentam tempo de trabalhabilidade menor do que o observado para os concretos convencionais. Com isso, deve-se abreviar o intervalo entre o fim da mistura e o início do lançamento desse material (TEZUKA, 1988).

Com relação à cura, diversos estudos indicam que o desenvolvimento das propriedades dos concretos modificados com SB tem melhor desempenho para processos de cura úmida com tempos mais curtos do que os utilizados para os concretos tradicionais. Este efeito ocorre porque a alta umidade nas primeiras idades retarda o processo de coalescência do polímero presente no concreto modificado com SB (OHAMA, 1991 e 1998; RAY et al., 1996).

Além disso, a diminuição da permeabilidade dos concretos modificados com SB reduz a entrada de água no concreto durante o processo de cura úmida, assim como também reduz a perda de água para o ambiente. Dessa forma, os processos de cura úmida têm menor eficácia neste tipo de material.

Nos estudos realizados por TEZUKA (1988), WALTERS (1990), STORTE (1991), SHAKER et al. (1997), assim como por FERREIRA JUNIOR (1997), observou-se que a cura úmida, apenas nas primeiras 24 horas após a desmoldagem, foi o processo que apresentou melhor desempenho das propriedades dos concretos modificados com SB.

Autores como RAY et al. (1995) e FOWLER (1999), recomendam a cura úmida nas primeiras 48 horas para os concretos modificados com SB.

Já os pesquisadores AFRIDI et al. (1994), FOLIC e RADONJANIN (1998) e OHAMA (1998), recomendam, para os concretos modificados com SB, a cura úmida nos primeiros 7 dias de idade.

2.3. Propriedades dos concretos modificados com SB

2.3.1. Propriedades no estado fresco

Os concretos modificados com SB apresentam aumento de trabalhabilidade no estado fresco em relação aos concretos tradicionais, para valores semelhantes de relação água/cimento (a/c). Esse efeito pode ser relacionado com o aumento do valor do índice de consistência dos concretos modificados com SB, atribuído, principalmente, ao efeito

dispersante dos estabilizadores presentes no SB e ao efeito lubrificante (ball bearing) das partículas de polímero (SAIJA, 1995; ACI, 1995; ALLAN, 1997 e OHAMA, 1998).

Dessa forma, para um mesmo nível de índice de consistência, os concretos modificados com SB apresentam valores da relação água/cimento inferiores aos observados para os concretos tradicionais. Além disso, observa-se a redução da relação água/cimento com o aumento da relação polímero/cimento (P/C) (SHAKER et al., 1997; RAY et al., 1994).

Nos estudos realizados por STORTE (1991), SHAKER et al. (1997) e, também, por FERREIRA JÚNIOR (1997), observou-se que os concretos modificados com SB com relações P/C variando entre 10 e 20%, apresentaram redução da relação a/c entre 15 e 50%, em comparação aos concretos sem SB, com os mesmos níveis de índice de consistência.

Entretanto, os concretos modificados com SB apresentam tempo de trabalhabilidade no estado fresco inferior ao observado para os concretos tradicionais. Esta redução de tempo de trabalhabilidade depende das condições de temperatura e umidade de exposição do material e ocorre devido a formação de um filme polimérico na superfície exposta do concreto (TEZUKA, 1988; ACI, 1995; OHAMA, 1998).

Normalmente, os concretos modificados com SB apresentam aumento do valor do teor de ar incorporado em relação aos concretos tradicionais, devido essencialmente aos estabilizadores presentes no látex, que pode ocasionar prejuízos das propriedades mecânicas deste material. Entretanto, este efeito pode ser controlado com a adição de agentes anti-espumantes no látex de estireno butadieno, geralmente produtos à base de silicone (WALTERS, 1988 e STORTE, 1991).

Observa-se um aumento significativo nos tempos de início e fim de pega das pastas de cimento Portland com a utilização de SB. Segundo RAY et al. (1994), OHAMA (1998), assim como OLLITRAULT-FICHET et al. (1998), esse fenômeno ocorre principalmente devido ao efeito de encapsulamento dos grãos de cimento pelo polímero durante o processo de hidratação, que restringi a quantidade de água em contato com esses grãos, ocasionando, assim, a redução da velocidade das reações de hidratação do cimento. O aumento dos tempos de pega das pastas de cimento modificadas com SB pode retardar o desenvolvimento das resistências mecânicas iniciais dos concretos e argamassas.

A Figura 2.1 ilustra o efeito do encapsulamento dos grãos de cimento pelo polímero, que além de aumentar os tempos de início e fim de pega, pode também ser responsável pela redução do grau de hidratação da matriz de cimento (RAY et al., 1996).

FIGURA 2.1. Ilustração (MEV) do efeito do encapsulamento dos grãos de cimento pelo polímero. (a) polímero disperso na matriz de cimento, (b) acúmulo de polímero ao redor do grão de cimento (encapsulamento), e (c) grão de cimento anidro. (Fonte: OLLITRAULT-FICHET et al., 1998)

2.3.2. Propriedades no estado endurecido

Normalmente, não se observa o aumento dos valores da resistência à compressão dos concretos com a utilização de SB, podendo, ainda, ocorrer redução dos valores dessa propriedade, caso haja incorporação excessiva de ar (TEZUKA, 1988; STORTE, 1991; OKBA et al., 1997; FOLIC e RADONJANIN, 1998 e OHAMA, 1998).

Entretanto, em comparação aos concreto tradicionais, os concretos modificados com SB apresentam aumento expressivo dos valores de resistência à tração, tanto na compressão diametral quanto na flexão. Esse efeito pode ser atribuído, além da redução da relação a/c com a utilização de SB, ao alto valor de resistência à tração do copolímero de estireno butadieno e ao aumento da aderência entre a matriz de cimento e o agregado (OHAMA, 1998).

Nos estudos realizados por TEZUKA (1988) e OKBA et al. (1997), observou-se que os valores da resistência à tração por compressão diametral dos concretos modificados com SB variaram entre 13 e 18% dos valores da resistência à compressão, notavelmente superior ao observado para os concretos tradicionais, geralmente abaixo de 10% da resistência à compressão.

Com relação a resistência à tração na flexão, observa-se nas pesquisas realizadas por TEZUKA (1988), STORTE (1991), FERREIRA JÚNIOR (1997), assim como por FOLIC e RADONJANIN (1998), que os concretos modificados com SB apresentaram aumento entre 10 e 40% dos valores dessa propriedade em relação aos observados para os concretos tradicionais. Nestes estudos os valores da relação P/C variaram entre 5 e 20%, em massa.

Os concretos modificados com SB apresentam redução dos valores do módulo de deformação, em comparação aos observados nos concretos tradicionais, que, segundo OHAMA (1998), ocorre devido ao baixo valor do módulo de deformação do copolímero de estireno butadieno. Essa redução de valores, normalmente, apresenta variação entre 10 e 30%, segundo os estudos realizados por TEZUKA (1988) e FERREIRA JÚNIOR (1997). Como consequência da redução dos valores do módulo de deformação, os concretos modificados com SB apresentam deformações maiores do que as observadas para os concretos tradicionais, para o mesmo nível de tensão.

Conforme mencionado no início deste capítulo, o filme polimérico formado pela coalescência das partículas de polímero presentes no látex, preenche parcialmente os poros da matriz de cimento hidratada. Este efeito, associado à redução da relação a/c, promove a diminuição expressiva da permeabilidade dos concretos modificados com SB em comparação aos concretos tradicionais, resultando em um significativo aumento da durabilidade deste material.

Nos estudos realizados por OHAMA (1987), TEZUKA (1988), JIANG e ROY (1994), ACI (1995), OKBA et al. (1997), FERREIRA JÚNIOR (1997), assim como por MENTONY et al. (2001), pode-se observar o efeito da redução da permeabilidade à fluidos dos concretos modificados com SB, em relação aos tradicionais, em função da melhora expressiva de desempenho observada em propriedades como absorção de água, resistência à agentes químicos, carbonatação e penetração e difusão de íons cloretos.

Os concretos modificados com SB, normalmente, apresentam valores de resistência à abrasão superiores aos observados para os concretos convencionais, conforme os resultados obtidos por STORTE (1991), FERREIRA JÚNIOR (1997) e SHAKER et al. (1997).

A utilização de SB em concretos contribui também para a estabilidade dimensional desse material. Nos estudos apresentados por OHAMA e KAN (1982), STORTE (1991), JIANG e ROY (1994), ACI (1995) e OHAMA (1998), observa-se a redução significativa dos valores da retração por secagem e da fluência dos concretos modificados com SB, quando comparados aos concretos tradicionais.

2.4. Microestrutura da matriz de cimento modificada com SB

Os mecanismos de atuação dos polímeros nos concretos modificados ainda são pouco conhecidos, entretanto, os pesquisadores, normalmente, utilizam duas teorias para explicá-los. De acordo com a primeira teoria, não há interações químicas entre o polímero e os produtos da hidratação do cimento. Durante o processo de hidratação do cimento, a parte hidrófila do látex se apresenta dispersa no meio aquoso, enquanto a parte hidrófoba orienta-se para os poros e capilares vazios. Durante o processo de hidratação do cimento e secagem do concreto, a diminuição da quantidade de água livre promove a coalescência das partículas hidrófobas do polímero, formando assim um filme polimérico que preenche parcialmente os poros e capilares da matriz de cimento hidratada (CHANDRA e FLODIN, 1987; OHAMA, 1987; SAKAI e SUGITA, 1995).

Nos estudos realizados por OHAMA (1987) e RAY et al. (1996), pode-se constatar o efeito de preenchimento dos vazios dos concretos pelo polímero. Nesses estudos, utilizando-se a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM), pode-se observar que as pastas de cimento modificadas com SB apresentaram redução da quantidade e do diâmetro dos poros, em comparação às pastas sem SB. Considera-se este efeito o principal motivo da redução da permeabilidade dos concretos modificados com SB.

De acordo com a segunda teoria, a mais aceita entre os pesquisadores, além do fenômeno mencionado na primeira teoria, há, também, a interação química entre as partículas de polímero e alguns produtos da hidratação do cimento. Essas interações podem alterar a velocidade e o grau de hidratação do cimento e a quantidade e a

composição de alguns produtos da hidratação do cimento, especialmente do hidróxido de cálcio (BEN-DOR et al., 1985; CHANDRA e FLODIN, 1987; LARBI e BIJEN, 1990; AFRIDI et al., 1990; RAY et al., 1996; JANOTKA et al., 1996; SU et al., 1996; SILVA et al., 2002).

Nos estudos realizados por CHANDRA e FLODIN (1987), AFRIDI et al. (1989), AFRIDI et al. (1990), assim como por RAY et al. (1996), observou-se que as pastas modificadas com SB apresentaram redução significativa dos teores de Ca(OH)_2 , em relação às pastas sem SB. Segundo esses pesquisadores, esse efeito ocorre, principalmente, devido às reações do grupo carboxílico das partículas do copolímero com os íons Ca^{2+} , liberados durante o processo de hidratação do cimento, reduzindo, assim, a quantidade de Ca^{2+} disponível para a formação do Ca(OH)_2 . Observou-se, também, nesses estudos, que o Ca(OH)_2 formado nas pastas modificadas com SB apresentaram alterações em sua estrutura, devido à interpenetração do filme de polímero, que ocasionaram melhorias nas suas propriedades mecânicas e redução dos vazios.

Nos concretos modificados com látex, observa-se, também, a redução da quantidade de Ca(OH)_2 e da porosidade na zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, efeito que pode ser atribuído ao acúmulo de polímero nesta região. A zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, normalmente, apresenta maior quantidade de água do que a matriz de cimento, decorrência do efeito parede, e, conseqüentemente, maior quantidade de polímero, uma vez que nos concretos modificados o polímero está homogêneamente disperso no meio aquoso. Com isso, observa-se a redução da quantidade de Ca(OH)_2 , devido ao efeito de redução da quantidade de Ca^{2+} citado anteriormente, e ao preenchimento dos poros na zona de transição pelo polímero durante o processo de coalescência (SU, LARBI e BIJEN, 1991, SU, BIJEN e LARBI, 1991a, 1991b; GU et al., 1993; JIANG e ROY, 1994; CHU et al., 1994, BEELDENS et al., 1999; OLLITRAULT-FICHET et al., 1998).

2.5. Considerações sobre o concreto leve modificado com SB

Analisando as informações apresentadas neste capítulo, observou-se que a utilização de látex de estireno butadieno (SB) nos concretos tradicionais promove a melhoria expressiva do desempenho de algumas propriedades desse material, como a

redução da relação a/c, aumento da resistência à tração, redução da permeabilidade e da retração por secagem. Deve-se salientar, ainda, que a utilização de SB não ocasiona alterações no processo produtivo usualmente utilizado para os concretos.

Observando-se os aspectos referentes à substituição dos agregados tradicionais por agregados leves, mencionados no capítulo 01, e a necessidade de se obter melhorias de desempenho dos concretos destinados à produção de elementos esbeltos, mostra-se extremamente interessante a utilização do SB nos concretos leves.

Não foram observados, na bibliografia atual, registros do estudo ou da aplicação do concreto leve estrutural modificado com SB. Nesta pesquisa, este material foi desenvolvido para aplicação na produção de elementos pré-fabricados de pequena espessura, como telhas e painéis. Essa aplicação exige dos concretos características e propriedades diferenciadas das apresentadas pelos concretos tradicionais, motivando, assim, a utilização de concretos especiais como o aqui apresentado.

Assim, o objetivo desta tese é o desenvolvimento de um concreto extremamente adequado à produção de elementos pré-fabricados esbeltos, com propriedades diferenciadas de resistência mecânica e durabilidade, devido à utilização conjunta de sílica ativa, superplastificante, SB e agregados leves.

Para isso, desenvolveu-se um programa experimental amplo para a análise dos concretos leves modificados com SB, que será descrito no próximo capítulo, com a intenção de apresentar processos de dosagem e produção adequados, caracterizar as propriedades nos estados fresco e endurecido, analisar a ductilidade e a tenacidade de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados submetidos à flexão, assim como obter informações microestruturais sobre a matriz de cimento e a interface agregado-matriz deste material.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Em conformidade com os objetivos desta pesquisa, mencionados nos capítulos anteriores, este capítulo apresenta o detalhamento do programa experimental adotado para o estudo dos concretos leves de alto desempenho modificados com SB, destinados à produção de elementos pré-fabricados de pequena espessura, que pode ser resumido em sete etapas, como descrito na Tabela 3.1.

TABELA 3.1. Resumo do programa experimental

<i>Etapa</i>	<i>Descrição</i>
1	Caracterização dos materiais
2	Estudo da interação entre os materiais
3	Dosagem dos concretos
4	Produção dos concretos
5	Caracterização das propriedades dos concretos
6	Análise da ductilidade de elementos pré-fabricados submetidos à flexão
7	Estudo microestrutural da matriz de cimento e da interface agregado-matriz

3.1. Caracterização dos materiais

Todos os materiais empregados na produção dos concretos leves cumprem as especificações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, são facilmente encontrados no mercado e foram utilizados nas mesmas condições em que são empregados usualmente.

Na produção dos concretos leves, utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), sílica ativa (SA), superplastificante acelerador (SPA), látex de estireno butadieno

(SB), areia natural quartzosa e argila expandida nacional ($D_{\text{máx}} = 9,5 \text{ mm}$). As características e propriedades dos materiais utilizados na produção dos concretos leves são apresentadas, detalhadamente, no Anexo A.

3.2. Estudo da interação entre os materiais

Realizou-se um estudo com a finalidade de detectar uma possível incompatibilidade físico-química entre os materiais constituintes dos concretos leves, utilizando-se o método do “mini-slump” proposto por KANTRO (1980) e analisando-se os tempos de pega das pastas.

Analisando os resultados desse estudo, apresentado no Anexo B, não se observou incompatibilidade do uso conjunto de superplastificante, látex de estireno butadieno, sílica ativa e cimento Portland de alta resistência inicial. Observou-se, ainda, o aumento significativo dos tempos de início e fim de pega nas pastas modificadas com SB, em relação à pasta de referência.

3.3. Dosagem dos concretos

Desenvolveu-se, nesta pesquisa, um processo de dosagem totalmente experimental, apresentado no Anexo C, para a obtenção de concretos leves modificados com SB, com as características e propriedades desejadas, sendo as principais: fator de eficiência mínimo aos 7 dias de idade de $25 \text{ MPa} \cdot \text{dm}^3/\text{kg}$, resistência à compressão aos 7 dias superior à 35 MPa e índice de consistência (NBR 7215) de $200 \pm 10 \text{ mm}$. A Tabela 3.2 apresenta os traços dos concretos leves obtidos no processo de dosagem experimental.

Os teores de sílica ativa e de superplastificante utilizados nos concreto leves foram 10% e 1,5%, respectivamente, ambos em relação à massa de cimento. Empregou-se SB nos concreto leves com relações de polímero/cimento (P/C) de 5 e 10%, valores equivalentes aos teores de látex/cimento de 10 e 20%, em massa, respectivamente, uma vez que a quantidade de copolímero de estireno butadieno presente no látex (teor de sólidos do látex) é de 50%.

TABELA 3.2. Dosagens dos concretos leves

Traço	Relação P/C (%) (em massa)	Consumo de materiais por m ³ (kg)						Relação a/agl (em massa)
		CPV ARI	SA*	Areia	Arg.1**	Arg.2***	SPA	
1	0	710	71,0	191,7	223,7	223,7	10,6	0,37
	5	706	70,6	190,6	222,4	222,4	10,6	0,33
	10	687	68,7	185,5	216,4	216,4	10,3	0,31
2	0	613	61,3	214,6	247,0	247,0	9,2	0,41
	5	614	61,4	214,9	247,4	247,4	9,2	0,36
	10	598	59,8	209,3	241,0	241,0	9,0	0,34
3	0	544	54,4	228,5	266,6	266,6	8,2	0,45
	5	542	54,2	227,6	265,6	265,6	8,1	0,39
	10	541	54,1	227,2	265,1	265,1	8,1	0,36
4	0	484	48,4	242,0	279,8	279,8	7,3	0,49
	5	491	49,1	245,5	283,8	283,8	7,4	0,41
	10	486	48,6	243,0	280,9	280,9	7,3	0,38
5	0	440	44,0	250,8	292,6	292,6	6,6	0,54
	5	442	44,2	251,9	293,9	293,9	6,6	0,46
	10	440	44,0	250,8	292,6	292,6	6,6	0,41

* Sílica ativa; ** Argila Expandida com D_{máx} = 4,8 mm; *** Argila Expandida com D_{máx} = 9,5 mm.

3.4. Produção dos concretos

3.4.1. Mistura dos materiais

Para a verificação do teor de umidade ideal dos agregados leves e a sequência adequada de colocação dos materiais no misturador para a produção dos concretos leves, realizou-se um estudo sobre a perda de consistência dos concreto leves, durante as duas primeiras horas após a mistura dos materiais, utilizando-se os métodos de mistura descritos por ARMELIN et al. (1994) (método A) e ZHANG e GJØRV (1991a) (método B), apresentados na Tabela 3.3. Foram analisadas as cinco dosagens de concreto leve sem SB apresentadas na Tabela 3.2.

Para a verificação da perda de consistência dos concretos leves, empregou-se uma adaptação do método apresentado na NBR 10342, conforme descrito no item 3.5.2.1. *Perda de consistência com o tempo*. O valor inicial fixado para o índice de consistência foi de 200 ± 10 mm, de acordo com a trabalhabilidade necessária para moldagem de peças de pequena espessura, verificada no estudo de dosagem.

TABELA 3.3. Métodos de mistura dos materiais para produção dos concretos

<i>Método</i>	<i>Seqüência da Mistura</i>
A*	1. Cimento, areia e 50% da água; 2. Sílica ativa, superplastificante e 50% da água; 3. Agregado leve.
B	1º. Agregado leve e 50% da água, misturados por 10 minutos; 2º. Sílica ativa, superplastificante, cimento, areia e 50% da água.

* Método adotado.

Os materiais foram misturados em uma betoneira do tipo planetária, com capacidade de 60 dm³ à temperatura de 25 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 65 ± 15%, até obter-se uma mistura homogênea, aproximadamente 5 minutos para 40 dm³ de concreto leve.

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 3.1 e 3.2, percebe-se que o método A resultou em maior perda de consistência nos traços com maior teor de cimento (traços 1 e 2) e menor perda de consistência nos traços com menor teor de cimento (traços 4 e 5), em relação aos valores obtidos para o método B. Observa-se, ainda, que os valores de perda de consistência, após 2 horas, para as cinco dosagens preparadas segundo o método B, apresentaram menor dispersão do que os obtidos para as preparadas segundo o método A.

No entanto a diferença entre os valores do índice de consistência, após 2 horas da mistura dos materiais para os dois métodos, apresenta-se pouco expressiva e todas as dosagens apresentaram condições para moldagem durante a primeira hora após a mistura dos materiais (índice de consistência superior a 170 mm – NBR 7215). Com isso, verifica-se que a saturação prévia dos agregados leves em estudo não altera significativamente os valores da perda de consistência dos concretos leves nas primeiras duas horas após a mistura, provavelmente devido aos baixos valores de absorção de água desses agregados, em comparação a outros tipos de agregados leves. Assim, para beneficiar o processo produtivo do concreto leve em estudo, destinado a peças pré-fabricadas, foi adotado o método A para a mistura dos materiais. Para a produção dos concretos leves modificados, o SB deve ser misturado na porção de água a ser adicionada na segunda etapa da mistura.

FIGURA 3.1. Perda de consistência para concretos misturados segundo o método A

FIGURA 3.2. Perda de consistência concretos misturados segundo o método B

3.4.2. Adensamento

Adotou-se a vibração por imersão para o adensamento dos corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura e adensamento em mesa vibratória para os corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e para os corpos-de-prova prismáticos.

As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram os corpos-de-prova após ruptura à tração por compressão diametral e à tração na flexão, respectivamente, nos quais se pode observar que os processos de adensamento utilizados foram eficientes, evitando a segregação dos agregados leves.

FIGURA 3.3. Corpo-de-prova cilíndrico 100 x 200 mm após ruptura à tração por compressão diametral

FIGURA 3.4. Corpo-de-prova prismático 150 x 150 x 500 mm após ruptura à tração por flexão

A Figura 3.5 ilustra a zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento, em que se observa que os métodos de adensamento adotados foram adequados para evitar a acumulação de bolhas de ar ao redor do agregado, provenientes da absorção de água.

FIGURA 3.5. Micrografia ótica de transmissão da zona de transição entre o agregado leve e a matriz de cimento (magnificação de 100x)

3.4.3. Procedimento de cura

Para avaliar o procedimento de cura adequado dos concretos leves modificados com SB, analisou-se o desenvolvimento de algumas propriedades dos concretos leves submetidos a diversos procedimentos de cura. As propriedades analisadas foram

resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, retração por secagem e absorção de água por imersão,

Com os resultados desse estudo, apresentado no Anexo D, observou-se que a utilização de SB possibilita a redução do tempo de cura úmida, nas primeiras idades dos concretos leves.

De acordo com os resultados obtidos nesse estudo, para a caracterização das propriedades dos concretos leves sem SB, adotou-se a cura úmida ($T = 23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $UR = 95\%$) dos corpos-de-prova, durante 27 dias após a desmoldagem ou até a idade de análise, para o caso de idades inferiores. Para a caracterização das propriedades dos concretos leves modificados com SB, realizou-se a cura úmida dos corpos-de-prova durante 1 dia apenas após a desmoldagem.

3.5. Procedimentos experimentais para caracterização das propriedades dos concretos leves

3.5.1. Procedimentos experimentais normatizados

A Tabela 3.4 apresenta os procedimentos normatizados utilizados na avaliação das propriedades dos concretos leves.

3.5.2. Procedimentos experimentais não normatizados ou adaptados

3.5.2.1. Perda de consistência com o tempo

O método utilizado para a determinação da perda de consistência com o tempo dos concretos leves fundamentou-se no método descrito pela NBR 10342. Entretanto em substituição à determinação do abatimento pelo tronco de cone, utilizou-se o método de determinação do índice de consistência por espalhamento descrito pela NBR 7215. Os intervalos de determinação do índice de consistência do concreto foram mantidos em 15 minutos.

3.5.2.2. Determinação do diagrama tensão-deformação com deformação controlada

O procedimento utilizado na determinação do diagrama tensão-deformação com deformação controlada dos concretos leves baseou-se no procedimento descrito pela NBR 8522. Entretanto optou-se pela taxa de deformação constante de 0,005 mm/m/s em substituição à taxa de carregamento constante de $0,50 \pm 0,05$ MPa/s, previsto pela NBR 8522. Com a taxa de deformação constante, o corpo-de-prova não sofre colapso na solicitação do carregamento último e, com isso, possibilita o traçado parcial da parte descendente do diagrama tensão-deformação.

TABELA 3.4. Procedimentos experimentais normatizados

<i>Item</i>	<i>Norma</i>
Índice de consistência	<i>NBR 7215. Cimento Portland – determinação da resistência à compressão</i>
	<i>NBR 9606. Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone</i>
Massa específica no estado fresco e teor do ar incorporado	<i>NBR 9833. Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico</i>
Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão	<i>NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.</i>
Resistência à compressão	<i>NBR 5739. Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto</i>
Resistência à tração	<i>NBR 7222. Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos</i>
Resistência à tração na flexão	<i>NBR 12142. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos</i>
Módulo de deformação e gráfico tensão-deformação	<i>NBR 8522. Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação</i>
Retração por secagem	<i>ASTM C 157-93. Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete</i>
Absorção de água por capilaridade	<i>NBR 9779. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade</i>
Resistência à agentes químicos	<i>ASTM C 267-96. Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concrete</i>

3.5.2.3. Determinação da resistência ao impacto

O método utilizado para a determinação da resistência ao impacto dos concretos leves consiste, basicamente, na queda livre de uma esfera com massa conhecida sobre o centro de um corpo-de-prova prismático de concreto assentado em um colchão de areia. A resistência ao impacto do corpo-de-prova (R_i) é determinada em função da energia necessária para produzir a primeira fissura na face inferior e/ou a ruptura do corpo-de-prova. A Equação 3.1 apresenta a relação entre a resistência ao impacto (R_i), expresso em Joules (J), a massa da esfera (m) e a altura de queda (h) necessária para produzir a primeira fissura e/ou a ruptura do corpo-de-prova.

$$R_i = h \cdot m \cdot a \quad (\text{N.m ou J}) \quad (3.1)$$

Onde: h = altura de queda (m)

m = massa da esfera (kg)

a = aceleração da gravidade (m/s^2)

Para a determinação da resistência ao impacto utilizou-se uma esfera de aço com massa de 6 kg, corpo-de-prova de concreto leve com dimensões de 7,5 cm de espessura, 30 cm de comprimento e 30 cm de largura e caixa de areia com dimensões de 15 cm de altura, 50 cm de comprimento e 50 cm de largura. A altura de queda inicial foi de 10 cm, com incrementos de 2,5 cm até atingir a altura de queda necessária para produzir a primeira fissura e/ou ruptura do corpo-de-prova. Após cada queda da esfera, o corpo-de-prova foi retirado do colchão de areia para a verificação do aparecimento de fissuras e para o acerto da superfície caixa de areia. A Figura 3.7 apresenta uma ilustração geral do procedimento utilizado para determinar a resistência ao impacto dos corpos-de-prova de concreto leve. Este método foi utilizado com sucesso por diversos pesquisadores (SILVA, 1990; FERREIRA JÚNIOR, 1997) e pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP.

3.5.2.4. Determinação da resistência à abrasão por jateamento de areia

A determinação da resistência à abrasão por jateamento da areia do concreto leve foi realizada utilizando-se o procedimento descrito pela ASTM C 418-90. Entretanto dois parâmetros do ensaio foram alterados para adequar o procedimento experimental ao material analisado, uma vez que os concretos leves apresentam baixa resistência à abrasão, quando comparados aos concretos com agregados tradicionais. A

Tabela 3.5 apresenta os parâmetros alterados do procedimento descrito pela ASTM C 418-90.

FIGURA 3.6. Ilustração do procedimento para a determinação da resistência ao impacto

TABELA 3.5. Parâmetros alterados para realização do ensaio de abrasão por jateamento de areia, segundo a ASTM C 418-90

<i>Parâmetro</i>	<i>Previsto pela ASTM C 418-90</i>	<i>Utilizado</i>
Diâmetro interno do bico do revólver para aplicação do jato de areia (mm)	6,35	9,0
Tempo de aplicação do jato de areia sobre a amostra (s)	60	30

3.5.2.5. Determinação da resistência à penetração de cloretos

Para a determinação da resistência à penetração de íons cloretos dos concretos leves empregou-se um dispositivo denominado célula de penetração acelerada de cloretos, adotado por diversos pesquisadores como AL-TAYYIB e AL-ZAHRANI

(1990), DETWILER et al. (1991), OKBA et al. (1997), assim como SHAKER et al. (1997). A Figura 3.7 apresenta um diagrama esquemático da célula de penetração acelerada de cloretos.

O corpo-de-prova utilizado na determinação de resistência à penetração de cloretos consiste num cilindro de concreto com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, com uma barra de aço (CA-50 e diâmetro de 10 mm) inserida no centro do corpo-de-prova com 150 mm de profundidade.

Na célula de penetração acelerada de cloretos, o corpo-de-prova ficou imerso até meia altura (100 mm) em uma solução de cloreto de sódio com concentração de 15% (em massa) à temperatura ambiente. Aplicou-se uma tensão constante de 12 V (DC) entre a barra de aço do corpo-de-prova (ânodo) e uma placa de aço (cátodo) imersa na solução de cloreto de sódio.

FIGURA 3.7. Diagrama esquemático da célula de penetração acelerada de cloretos

Durante a execução do ensaio, a corrente elétrica do sistema foi monitorada constantemente para observar o tempo necessário para ocorrer o ataque químico à barra de aço do corpo-de-prova, caracterizado pela rápida e brusca elevação do valor da corrente elétrica do sistema, que determina o final do ensaio. O tempo necessário para ocorrer o ataque da barra de aço denomina-se “tempo de corrosão”. O corpo-de-prova

foi monitorado por inspeção visual periódica, para observar o aparecimento de fissuras, que indicam o ataque da barra de aço no corpo-de-prova.

Utilizou-se um gráfico de corrente elétrica *versus* tempo para a representação dos resultados dessa análise. A rápida elevação no valor da corrente elétrica do sistema, representada pela alteração da direção da curva no gráfico, determina o tempo de corrosão.

3.5.2.6. Determinação do coeficiente de permeabilidade à água

Empregou-se uma adaptação do procedimento descrito na NBR 10786, para a determinação do coeficiente de permeabilidade à água dos concretos leves. Para a compatibilização dessa análise com os equipamentos disponíveis no Laboratório de Construção Civil - LCC, EESC – USP, fez-se necessário reduzir a pressão de funcionamento, utilizada para aplicar água sob pressão em uma das faces do corpo-de-prova, de 4 MPa para 0,7 MPa e adotou-se a vazão de saída do sistema, isto é, a que percola pelo corpo-de-prova, para o cálculo do coeficiente de permeabilidade. Para isso, foi incorporado um orifício no dispositivo que abriga o corpo-de-prova, na face oposta à que recebe água sob pressão, para coleta da água. Manteve-se os demais parâmetros previstos na NBR 10786.

3.6. Procedimento experimental para análise de elementos construtivos pré-fabricados submetidos à flexão

3.6.1. Características das peças

Para a realização da análise experimental, com o objetivo de avaliar a ductilidade e a tenacidade de elementos construtivos esbeltos produzidos com os concretos leves em estudo, foram utilizadas peças com 3 m de comprimento e espessura média de 2,8 cm, cujas características são apresentadas na Figura 3.8. Essa tipologia de peça pré-fabricada pode ser utilizada nos mais diversos tipos de construções, tanto com a função de vedação (cobertura e vedação vertical), quanto com a função estrutural (elementos de laje). Assim, como esta tipologia se mostra extremamente versátil e de fácil produção e transporte, foi adotada para a análise experimental do comportamento

de peças de pequena espessura, produzidas com os concretos leves em estudo, submetidas essencialmente à solicitação de flexão.

FIGURA 3.8. Características das peças pré-fabricadas e da armadura

Nas peças analisadas, utilizou-se armadura mínima, constituída por tela EQ98 (malha quadrada, espaçamento entre fios de 5 cm e diâmetro do fio de 2,5 mm) e

reforços com vergalhões de aço CA 60, com diâmetro de 4,2 mm, conforme as características apresentadas na Figura 3.8.

3.6.2. Produção das peças

As peças foram produzidas no Laboratório de Construção Civil, EESC – USP, utilizando-se duas formas metálicas idênticas e desmontáveis. Foram moldadas 6 peças com os concretos leves nas dosagens 1 e 5, com as relações P/C de 0, 5 e 10%.

Utilizaram-se espaçadores plásticos para posicionar adequadamente a armadura e assegurar o recobrimento idêntico de concreto nas duas faces da armadura. Para o adensamento do concreto leve, empregaram-se dois vibradores acoplados externamente à forma metálica.

As formas foram preenchidas em 8 etapas, com a mesma quantidade de concreto em cada uma, utilizando-se 15 segundos de vibração externa, para cada etapa. Após o preenchimento completo com o concreto leve, a face exposta de concreto na forma foi coberta com filme plástico, para evitar perda de água por evaporação. As peças foram desmoldadas após 24 horas, sendo imediatamente submetidas à cura úmida até a data de ensaio, ou seja, durante 6 dias. Após a cura úmida as peças foram transportadas para o Laboratório de Engenharia de Estruturas do Departamento de Estruturas, EESC – USP, local onde foram ensaiadas. As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam as características da forma, armadura e das peças após a desmoldagem .

3.6.3. Tipologia do Carregamento

Diante das possibilidades de aplicação das cargas na peça, optou-se pela aplicação de duas forças de igual intensidade, equidistantes dos apoios. Com isso, foi possível obter uma grande região da peça submetida à solicitação de momento fletor constante (Figuras 3.11 e 3.12).

FIGURA 3.9. Forma e armadura das peças FIGURA 3.10. Peças após desmoldagem

FIGURA 3.11. Posicionamento do carregamento e dos defletômetros

FIGURA 3.12. Posicionamento do carregamento e dos defletômetros

3.6.4. Equipamentos Utilizados

Utilizou-se um cilindro hidráulico, de capacidade máxima de 100 kN, acionado por bomba hidráulica manual. Para a medição dos deslocamentos, foram empregados defletômetros mecânicos da marca Mitutoyo, com precisão nominal de centésimo de milímetro e com curso total de 50 mm. As Figuras 3.11 e 3.12 apresentam as ilustrações do posicionamento dos 6 defletômetros utilizados.

No acompanhamento do aparecimento e abertura das fissuras, utilizou-se iluminação com lanternas de foco direcional e lupas. A medida da abertura das fissuras foi realizada com lupa graduada Mitutoyo e Régua Comparadora LNEC.

3.6.5. Aplicação do Carregamento

O carregamento aplicado nas peças foi dividido em 15 etapas, com intervalo de 5 minutos entre as etapas de aplicação de carga. As leituras nos defletômetros foram feitas após 2 minutos da aplicação de cada carga. No início do ensaio, foram aplicadas duas etapas de carga, para fins de acomodação da peça, com descarregamento total posterior. Em seguida, os carregamentos foram novamente aplicados até o instante em que ocorresse o colapso da peça ou o deslocamento de $1/300$ (compatível com lajes) no centro da peça.

3.7. Procedimentos experimentais para a análise microestrutural

As técnicas utilizadas para o estudo microestrutural das pastas e concretos foram Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM), Difractometria de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Espectrografia por Dispersão de Energias (EDS) e Microscopia Ótica de Transmissão (MOT).

3.7.1. Pastas e concretos analisados

Para o estudo da microestrutura da matriz de cimento, foram utilizadas amostras de pastas de cimento, para que não houvesse a interferência dos agregados. No estudo da zona de transição da interface entre o agregado e a matriz de cimento foram utilizadas amostras de concretos com agregados leves. Para efeito de comparação, também foram analisados concretos com agregados tradicionais. Neste último tipo de concreto, utilizou-se brita basáltica, com massa específica de $2,88 \text{ kg/dm}^3$, massa unitária de $1,32 \text{ kg/dm}^3$ e dimensão máxima característica de 9,5 mm.

A Tabela 3.6 apresenta os 13 tipos de pastas de cimento utilizadas, com relação água/aglomerante fixa de 0,40, em massa. A pasta número 1 foi preparada apenas com cimento e água para ser utilizada como referência. Nas demais pastas foram utilizados os teores de sílica ativa e SB adotados no processo de dosagem dos concretos leves, além de teores complementares, para a melhor compreensão do efeito dessas adições na matriz de cimento.

Os 12 tipos de concretos estudados foram preparados utilizando-se os teores de sílica ativa e SB adotados no processo de dosagem dos concretos leves, conforme descrito na Tabela 3.7, com relação água/aglomerante de 0,40 para todas as dosagens. Utilizou-se a relação cimento/agregado de 1:1, em massa. A composição dos agregados para os concretos leves foi, em massa, de 30% de areia e 35% de cada tipo de argila expandida. Para os concretos com massa específica normal, a composição dos agregados utilizada foi de 30% de areia e 70% de basalto, em massa.

As pastas foram moldadas em corpos-de-prova cilíndricos de 20 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Para os concretos, foram utilizados corpos-de-prova de 35 mm de diâmetro e 70 mm de altura. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram acondicionados em câmara úmida ($23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $95 \pm 5\%$ UR) e desmoldados após 24 horas. Em seguida, os corpos-de-prova sem SB permaneceram na câmara úmida por

mais 27 dias e os com SB, por mais 6 dias. Após o período de cura úmida, os corpos-de-prova foram envolvidos em um filme plástico até a realização dos ensaios.

TABELA 3.6. Dosagem das pastas utilizadas nos estudos microestruturais

<i>PASTA</i>	<i>Sílica Ativa (SA)*</i> (%)	<i>P/C</i> (em massa)	<i>Superplastificante (SPA)*</i> (%)
1	-	-	-
2	5,0	-	1,5
3	10,0	-	1,5
4	15,0	-	1,5
5	-	2,5	-
6	-	5,0	-
7	-	7,5	-
8	-	10,0	-
9	-	15,0	-
10	10,0	2,5	1,5
11	10,0	5,0	1,5
12	10,0	7,5	1,5
13	10,0	10,0	1,5

* % em relação à massa de cimento; ** Relação água / aglomerante = 0,40.

TABELA 3.7. Dosagem dos concretos utilizados nos estudos microestruturais

<i>Concreto</i>	<i>Sílica Ativa*</i>	<i>P/C</i> (em massa)	<i>SPA*</i>	<i>Agregado graúdo</i>	<i>Agregado miúdo</i>
1A	-	-	-	Argila expandida	Areia natural
1B				Basalto	
3A	10	-	1,5	Argila expandida	
3B				Basalto	
6A	-	5	-	Argila expandida	
6B				Basalto	
8A	-	10	-	Argila expandida	
8B				Basalto	
11A	10	5	1,5	Argila expandida	
11B				Basalto	
13A	10	10	1,5	Argila expandida	
13B				Basalto	

* % em relação à massa de cimento; ** Relação água / aglomerante = 0,40.

3.7.2. Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

O método de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) foi empregado para a determinação do volume e da variação dimensional dos poros nas pastas de cimento. Esse método está baseado no fato de que um líquido que não “molha” um sólido poroso só penetrará em seus poros sob a ação de pressão externa, sem a ação da capilaridade. O líquido utilizado neste método foi o mercúrio.

A análise da porosidade por intrusão de mercúrio foi realizada para as 13 pastas descritas na Tabela 3.6, com 100 dias de idade. As análises foram realizadas pelo Grupo de Estudos de Rochas Ornamentais (GERO), no Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, segundo as recomendações da ASTM D4404-84 (1992) e utilizando os equipamentos FILLING APPARATUS e AUTOSCAN50 da marca QUANTACHROME.

O tamanho equivalente dos poros preenchidos pelo mercúrio, admitindo os poros cilíndricos, pode ser associado à pressão aplicada pela equação 3.2.

$$d = - 4 \gamma (\cos \theta) / p \quad (3.2)$$

Onde: d = diâmetro do poro;
 γ = energia superficial do líquido (0,480 N/m);
 θ = ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro (147°);
 p = pressão aplicada.

Nas análises realizadas, a pressão aplicada variou entre 0,2 e 350 MPa, o que possibilitou a análise dos poros com diâmetro entre 0,005 e 10 μm , aproximadamente.

As amostras das pastas foram trituradas utilizando-se almofariz cerâmico. Selecionou-se a fração entre 2 e 7 mm para a realização das análises. Para a interrupção da hidratação, utilizou-se o tratamento com nitrogênio líquido, segundo recomendações da ASTM D4404-84 (1992), e em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de secagem por 12 horas em estufa à 105°C.

Após a secagem, um volume de aproximadamente 1,2 ml da amostra, medido com a utilização de um equipamento com precisão de $\pm 0,004$ ml, foi introduzido em um porta-amostras (penetrômetro) e, então, submetido a um vácuo de 20 Pa. Em

seguida, o mercúrio foi introduzido no penetrômetro e o sistema foi submetido à uma pressão inicial de 0,2 MPa. A pressão do sistema foi gradativamente aumentada, até atingir a pressão máxima de aproximadamente 350 MPa. Após cada incremento de pressão, o equipamento realizou uma pausa para leitura da pressão e volume do sistema estabilizado. Foram realizadas 2 análises para cada tipo de pasta.

3.7.3. Difractometria de Raios-X (DRX)

O método de Difração de Raios-X (DRX) foi utilizado para análise das 13 pastas descritas na Tabela 3.6 com 100 dias de idade. As análises foram realizadas no Núcleo de Química (NQ) do Departamento de Materiais de Construção (DMC), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

A análise por DRX tem caráter qualitativo, uma vez que está baseada na identificação das fases cristalinas presentes nas pastas de cimento, realizada através da análise dos picos presentes no difratograma. A identificação das substâncias presentes nas pastas de cimento foi realizada com o auxílio do banco de dados do NQ-LNEC.

As análises foram realizadas utilizando-se um Difrátômetro de Raios-X, da marca PHILIPS, modelo PW 3710, e gerador da marca PHILIPS, modelo PW 1830. As condições para a realização das análises foram:

- ♦ radiação: Co α ;
- ♦ tensão: 35kV;
- ♦ corrente: 45 mA;
- ♦ varredura com passo de $0,05^\circ 2\theta$;
- ♦ tempo de coleta: 1seg/ passo;
- ♦ intervalo de varredura: $3-74^\circ (2\theta)$; e
- ♦ tempo total da análise: 24 min.

Os corpos-de-prova foram triturados em fragmentos de aproximadamente 5 mm e submetidos à secagem em estufa ($T = 105^\circ\text{C}$), durante 12 horas. Em seguida, os fragmentos foram moídos, utilizando-se almofariz cerâmico. A amostra foi selecionada utilizando-se peneira com abertura de 106 μm . Após a moagem e seleção, a amostra foi colocada em um porta-amostra apropriado para o equipamento e submetida à análise de DRX.

3.7.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

3.7.4.1. Introdução

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi empregada para análise das 13 pastas de cimento apresentadas na Tabela 3.6 e dos 12 tipos de concretos apresentados na Tabela 3.7. Foram utilizados corpos-de-prova de pastas e concretos com 100 dias de idade. A preparação e análise das amostras foi realizada no Núcleo de Química (NQ) do Departamento de Materiais de Construção (DMC), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

O princípio de funcionamento do MEV consiste basicamente em realizar o varrimento da superfície de uma amostra com um feixe eletrônico finamente focado, em sincronismo com o varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto, pela intensidade de um sinal emitido pela amostra. Obtém-se, deste modo, uma correspondência, ponto a ponto, entre a imagem e a região observada da amostra, que depende da natureza da informação, do tipo de sinal registrado e do detector utilizado.

No processo de varrimento da amostra pelo feixe de elétrons, ocorrem interações que geram, entre outros tipos de sinais, elétrons retro-espalhados (BSE), elétrons secundários (SE) e Raios-X. Estes sinais podem ser captados por detectores específicos e gerar imagens da superfície da amostra. Segundo BALENDRAN et al. (1998), nas amostras de pastas e concretos, a interação entre a amostra e o feixe ocorre em um volume aproximado de 2 a 3 μm de profundidade e diâmetro.

Os elétrons secundários (SE) apresentam baixa energia e geram imagens com informações sobre o relevo da superfície da amostra. Para esse tipo de imagem, utiliza-se, usualmente, amostras fraturadas. O detector da SE capta os elétrons de todas as direções da superfície da amostra, possibilitando, assim, obter imagens com aspectos tridimensionais.

Os elétrons retro-espalhados (BSE) apresentam alta energia e geram imagens com informações sobre uma certa profundidade da superfície da amostra, normalmente polida. A emissão dos elétrons retro-espalhados aumenta com o aumento do número atômico do material analisado, permitindo a individualização de fases através de contraste de tons de cinza em função do número atômico médio (Z).

Acoplados ao MEV, detectores e sistemas de análises dos Raios-X emitidos da interação do feixe com a amostra possibilitam a análise qualitativa, semiquantitativa e quantitativa dos elementos presentes na superfície da amostra.

A determinação da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, assim como a análise das pastas de cimento, foram realizadas com a utilização do MEV associado à espectrografia por dispersão de energias (EDS). Para este tipo de análise, as superfícies planas mostram-se mais eficientes, por isso foram utilizadas amostras polidas.

3.7.4.2. Espectrografia por dispersão de energias (EDS)

A espectrografia de Raios-X por dispersão de energias (EDS), associada a sistemas de análises de Raios-X, permite realizar a análise química elementar em um ponto ou em uma área da amostra em termos qualitativos, semiquantitativos e quantitativos.

Os métodos de análise qualitativa e semiquantitativa se encontram, habitualmente, disponíveis nos sistemas de EDS e são usualmente utilizados, pois permitem, de forma rápida, a identificação e a determinação da composição dos elementos presentes na amostra. Nesses sistemas de análise, a identificação e a determinação da composição de um elemento são feitas pela comparação da intensidade das riscas espectrais características da amostra com espectros de referência. A análise dos espectros de Raios-X é feita, atualmente, utilizando-se o recurso de sistemas informatizados de bibliotecas de espectros, o que torna o processo bastante simples e rápido.

Para que os resultados das análises em EDS sejam significativos, é preciso que a amostra analisada seja suficientemente plana e esteja orientada, diretamente, para o detector de Raios-X, por esse motivo, devem ser utilizadas amostras polidas.

Todas as análises de EDS foram realizadas com tensão do feixe de elétrons de 15kV e com detector de Si(Li). As aquisições em EDS foram realizadas com o mesmo tempo de análise para todas as amostras.

3.7.4.3. *Análise semiquantitativa da zona de transição por MEV associado a EDS*

A determinação da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento pode ser feita através da análise dos produtos de hidratação do cimento, como hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita (AFt) e monosulfoaluminato de cálcio (AFm). A zona de transição é caracterizada pela apresentação de teores das substâncias referidas diferentes dos obtidos na matriz de cimento. Dessa forma, pode-se realizar uma análise pontual, ao longo de uma linha perpendicular à interface agregado-matriz, identificando os elementos presentes, e possibilitando, assim, avaliar a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Como a análise pontual por EDS atua num volume de alguns micrômetros cúbicos e as dimensões das partículas dos produtos das reações de hidratação do cimento variam entre alguns nanômetros e um micrômetro, os resultados de uma análise pontual representam a mistura de vários produtos de hidratação com diferentes tipos de composição. Assim, a determinação da composição de uma fase específica torna-se pouco precisa.

Entretanto pode-se obter uma estimativa da composição dos principais produtos da hidratação de cimento, como CH, C-S-H, AFt e AFm, em uma análise pontual através das relações entre as massas atômicas de alguns óxidos presentes nesta análise, como SiO₂, CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃ e SO₃. Para a referenciação dos respectivos óxidos, ao longo do trabalho foram utilizadas as seguintes abreviações: Si, Ca, Fe, Al e S.

Em pesquisas realizadas por TAYLOR e NEWBURY (1984), SARKAR et al. (1992), WASSERMAN e BENTUR (1996), assim como KJELSEN et al. (1998), foram estabelecidos valores numéricos para associar a presença de alguns produtos do cimento hidratado, em função das relações entre os óxidos mencionados anteriormente. Normalmente, a avaliação da presença dos produtos hidratados do cimento é feita em função da análise conjunta de vários quocientes das massas atômicas dos óxidos, como apresentado abaixo:

- **C-S-H:** $0,8 \leq \text{Ca/Si} \leq 2,5$ $(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} \leq 0,2$
- **CH:** $\text{Ca/Si} \geq 10$ $(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} \leq 0,04$ $\text{S/Ca} \leq 0,04$
- **AFm:** $\text{Ca/Si} \geq 4,0$ $(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} > 0,4$ $\text{S/Ca} > 0,15$

Por exemplo, se a análise dos produtos hidratados apresentar a relação entre as massas atômicas totais dos óxidos de cálcio e de silício (Ca/Si) menor do que 2,5, admite-se a presença de elevado teor de C-S-H, enquanto que relações Ca/Si superiores a 10 são indicativos de reduzida quantidade de C-S-H, sendo esta região relativamente rica em fases como CH e AFm.

As relações apresentadas anteriormente dependem de uma série de variáveis como tipo de cimento, adições, aditivos e idade da amostra. Entretanto são ótimas referências para avaliação comparativa da composição dos produtos hidratados de cimento, por meio da análise de EDS (VIEIRA, 2000).

Não foram encontradas relações numéricas indicativas da presença de etringita na bibliografia consultada. No entanto como a formação do AFm resulta da transformação da etringita, quando se esgota o gesso, é de se esperar que esse produto esteja presente na amostra para relações S/Ca superiores a 0,15. Esta afirmação é apenas qualitativa, necessitando, ainda, de aprofundamento teórico e experimental (COUTINHO, 1988; VIEIRA, 2000).

Por isso, no estudo da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, optou-se pela representação dos perfis de Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca, através da análise semiquantitativa por EDS associado ao MEV, em vários pontos ao longo de uma linha perpendicular à interface agregado-matriz.

3.7.4.4. Mapas de Raios-X

Como relatado anteriormente, sistemas de análise de imagens associado ao MEV, reunindo as informações da EDS, permitem a análise e a representação gráfica dos elementos químicos em uma área selecionada da amostra, denominados mapas de Raios-X.

Esses mapas permitem a visualização qualitativa dos elementos químicos presentes na região observada da amostra. A presença de cada elemento químico selecionado para análise é representada individualmente no mapa, apresentando a identificação do elemento em cada setor, separadamente. As regiões que apresentam maior densidade cromática são aquelas que apresentam maior concentração deste elemento químico.

3.7.4.5. Preparação das amostras

As amostras polidas foram preparadas de acordo com os procedimentos correntes do NQ-LNEC e as recomendações de STUTZMAN e CLIFTON (1999).

As amostras de pastas e concretos foram cortadas em dimensões adequadas ao porta-amostras do microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se serra de baixa rotação, com disco diamantado, lubrificado com água.

Após o corte, as amostras foram imersas em álcool isopropílico durante 24 horas para interrupção da hidratação da matriz de cimento. Em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de secagem, permanecendo 12 horas em estufa ventilada, com temperatura de 35°C e, em seguida, 24 horas em dissecador à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Esse processo de secagem, mesmo sendo considerado pouco prejudicial à microestrutura do concreto, ocasionou microfissuras nas amostras, principalmente na interface entre o agregado e a matriz de cimento, que não trouxeram prejuízos às análises realizadas.

Em seguida, para o preenchimento dos poros, as amostras foram submetidas ao processo de impregnação a vácuo, com embutimento a frio. Foi utilizada uma resina epoxy de dois componentes com baixa viscosidade, baixo índice de refração e baixa retração. Após 24 horas, o excesso de resina foi retirado utilizando lixa 100 de carbetto de silício e as amostras foram submetidas ao processo de polimento.

Inicialmente, o polimento das amostras foi realizado utilizando-se lixas de carbetto de silício 300, 400, 600 e 1000 em politriz de disco rotativo com lubrificação de óleo mineral. As amostras foram limpas, utilizando-se ultra-som com resfriamento em álcool isopropílico, após a finalização do polimento em cada tipo de lixa.

O polimento final foi feito utilizando-se pasta de diamante (suspensão de diamante em óleo mineral) com três diferentes tamanhos dos grãos: 6, 1 e 0,25 μm . Após o polimento final, as amostras foram novamente submetidas ao processo de limpeza em ultra-som, com resfriamento em álcool isopropílico.

Após o polimento, as amostras receberam uma camada condutora de carbono e foram mantidas em dissecador à temperatura ambiente, até o momento da análise.

A escolha e a análise das amostras de concreto para o estudo da interface entre o agregado e a matriz de cimento foram feitas tomando-se os seguintes cuidados: foram

utilizadas as amostras do centro do corpo-de-prova; o corte das amostras foi feito em regiões com pouca probabilidade de exudação ao redor do agregado; e foram analisadas as interfaces ao redor dos agregados com dimensão máxima (9,5 mm) na superfície analisada.

3.7.5. Microscopia Ótica de Transmissão (MOT)

A análise de pastas, argamassas e concretos de cimento Portland utilizando a técnica de Microscopia Ótica de Transmissão (MOT) consiste, basicamente, no estudo microestrutural de lâminas delgadas da amostra, com espessura variando de 20 a 40 μm , utilizando-se microscópio ótico de luz polarizada transmitida, podendo, ainda, ser utilizados alguns tipos de filtros, como placa de gesso, e as técnicas de polares cruzados e fluorescência (JAKOBSEN et al., 1997; RAY, 2000).

A análise dos concretos utilizando-se a MOT permite verificar se o material foi produzido de acordo com as especificações, obter uma descrição dos diferentes parâmetros da matriz cimentícia, incluindo a homogeneidade dos diferentes constituintes do concreto, a determinação qualitativa do tipo de aglomerante hidráulico, grau de hidratação, carbonatação, presença de adições, natureza dos produtos de hidratação, incorporação de ar, eficiência da cura e relação água/aglomerante. Esta técnica permite, ainda, a identificação de causas de deterioração dos concretos e de produtos de reações, tais como ataque de sulfatos, reação álcali-agregado e carbonatação (LNEC-E388-1993; LEEMAN e SARKAR, 1996; JAKOBSEN, 1998; CAMPBELL, 1999).

A existência de uma zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento foi constatada, originalmente, por FARRAN apud DIAMOND e HUANG (1998), há aproximadamente 50 anos, através de observações conseguidas por meio do uso de microscópio ótico. Nesses estudos, foi observada uma região próxima ao agregado, com baixo teor de grãos anidros de cimento, denominada, por este pesquisador, “auréola de transição”.

A microscopia ótica, principalmente a de transmissão, permite identificar alguns compostos da matriz de cimento hidratada, como os grãos anidros de cimento, pelos diferentes índices de refração à luz desses compostos.

A análise dos concretos com a técnica de MOT foi utilizada nesta pesquisa com a intenção de complementar os estudos da zona de transição agregado-matriz, realizados com MEV associado ao EDS, por meio da análise do comportamento dos grãos anidros de cimento nas proximidades do agregado.

Foi analisada a zona de transição dos 12 tipos de concretos descritos na Tabela 3.7 com 160 dias de idade, utilizando-se um microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX60, associado a um sistema informatizado de análise de imagens, alocado no Núcleo de Química (NQ) do Departamento de Materiais de Construção (DMC), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

3.7.5.1. Preparação das amostras

As amostras foram preparadas segundo as recomendações da especificação técnica LNEC-E389 (1993). Foram utilizados equipamentos da marca LOGITECH para a preparação das lâminas delgadas.

As amostras foram retiradas do centro dos corpos-de-prova de concreto, com dimensões de 30 mm de comprimento, 30 mm de largura e 20 mm de espessura, utilizando-se serra de baixa rotação, com disco diamantado, lubrificado com água. Em seguida, as amostras foram imersas em álcool isopropílico por 24 horas, para remoção total da água e submetidas à secagem em dissecador, por 24 horas.

Após a secagem, as amostras foram impregnadas a vácuo, com embutimento a frio, utilizando resina epoxídica de dois componentes de baixa viscosidade. Após 24 horas da impregnação, as amostras foram cortadas ao meio, apresentando assim espessura aproximada de 10 mm, utilizando-se serra de baixa rotação com disco diamantado, lubrificado com água. Sobre a superfície de corte das amostras, foram coladas lâminas de vidro comum. Em seguida, as amostras foram cortadas com espessura aproximada de 6 mm, paralelamente à lâmina de vidro.

Esta última superfície, obtida de corte das amostras, que será a superfície de análise, foi submetida ao polimento, utilizando-se abrasivo de alumina com diâmetro dos grãos de 15 μm . Após o polimento, as amostras foram limpas com banhos de ultra-som e submetidas à secagem, em dissecador, por 12 horas.

Em seguida, as amostras foram novamente impregnadas a vácuo, com embutimento a frio, utilizando-se resina epoxy de dois componentes de baixa viscosidade. Após 24 horas da impregnação, as amostras receberam novo polimento, na superfície de análise, para a retirada do excesso de resina, utilizando-se abrasivo de alumina com diâmetro dos grãos de 15 μm . Após esta etapa, as amostras foram limpas utilizando-se ultra-som e submetidas à secagem, em dissecador, por 12 horas.

Após a secagem, na superfície da análise das amostras foram coladas lâminas de vidro, com espessura de 1,2 mm, especiais para análise de MOT, utilizando-se cola epoxídica com baixo índice de refração. Após 24 horas da colagem, as amostras foram cortadas com espessura de 3 mm paralelamente à superfície de análise, descartando assim, a superfície oposta onde estava colada a lâmina de vidro comum. Após o corte, as lâminas com as amostras de concreto recebem um polimento, no equipamento de preparação de lâminas delgadas, utilizando-se abrasivo de alumina com diâmetro dos grãos de 15 μm , até que a amostra de concreto na lâmina tenha a espessura de 30 μm , espessura adotada como final.

Em seguida, as lâminas foram limpas, utilizando-se ultra-som e receberam uma lamela protetora, para evitar danos na superfície do concreto que possam trazer prejuízos à análise, como a carbonatação. A Figura 3.13 ilustra o aspecto das lâminas delgadas prontas para análise.

FIGURA 3.13. Lâminas delgadas de (a) concreto leve e (b) concreto com basalto

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo reserva-se à apresentação e à discussão dos resultados das análises experimentais dos concretos leves, divididas em três etapas principais: caracterização das propriedades dos concretos; análise do comportamento de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados submetidos à flexão; e estudo microestrutural da matriz de cimento e da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

4.1. Caracterização das propriedades dos concretos leves

As análises de absorção de água por imersão, índice de vazio e massa específica foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Estruturas, Departamento de Estruturas EESC – USP. As determinações do módulo de deformação, curva tensão-deformação e curva tensão-deformação com deformação controlada foram realizadas no Laboratório de Mecânica das Rochas, Departamento de Geotecnia EESC – USP. A análise da abrasão por jateamento de areia foi realizada no Instituto de Química de São Carlos – USP. As demais análises experimentais, referentes à caracterização das propriedades dos concretos leves, foram realizadas no Laboratório de Construção Civil (LCC), Departamento de Arquitetura e Urbanismo EESC – USP.

4.1.1. Propriedades no estado fresco

Todos os concretos leves estudados apresentaram coesão e consistência adequados para a moldagem dos corpos-de-prova. Os concretos modificados com SB apresentaram coesão maior do que a observada nos concretos sem SB. Não foram observados os fenômenos de exudação e segregação dos agregados nos concretos leves em estudo.

4.1.1.1. Índice de Consistência

Os valores do índice de consistência para todas as dosagens dos concretos leves obedeceram o intervalo 200 ± 10 mm, segundo as especificações da NBR 7215, e 400 ± 20 mm, segundo as especificações da NBR 9606.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.1, percebe-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram valores de redução da quantidade de água, em relação aos sem SB, de 14 e 21%, em média, para os concretos com relação P/C de 5 e 10%, respectivamente.

TABELA 4.1. Propriedades dos concretos leves no estado fresco

Traço	P/C (%)	Índice Consistência (mm)		Relação a/agl ⁽¹⁾	Redução de água (%) ^(2,3)	Consumo de cimento ⁽⁴⁾ (kg/m ³)	Massa esp. (kg/m ³) NBR 9833	Teor de Ar (%) NBR 9833
		NBR 7215	NBR 9606					
1	0	198	410	0.37	-	710	1717	2,3
	5	205	405	0.33	12	706	1704	3,0
	10	195	395	0.31	17	687	1679	4,0
2	0	203	415	0.41	-	613	1658	3,2
	5	195	410	0.36	13	614	1652	3,8
	10	200	405	0.34	18	598	1629	4,0
3	0	199	420	0.45	-	544	1633	2,5
	5	210	415	0.39	14	542	1615	4,0
	10	205	405	0.36	22	541	1618	3,8
4	0	198	420	0.49	-	484	1592	3,3
	5	197	395	0.41	17	491	1598	3,7
	10	208	410	0.38	22	486	1589	3,9
5	0	198	420	0.54	-	440	1583	2,5
	5	192	395	0.46	15	442	1570	3,9
	10	202	405	0.41	24	440	1562	4,4

⁽¹⁾ Quantidade de água efetiva (inclusive a presente no SPA e no látex);

⁽²⁾ Índice de consistência fixado em 200 ± 10 mm (NBR 7215).

⁽³⁾ Redução de água = $((A_1 - A_2) / A_1) \times 100$, onde: A_1 = água (kg) em 1 m³ concreto leve sem polímero;
 A_2 = água (kg) em 1 m³ concreto leve modificado com polímero.

⁽⁴⁾ Consumo de cimento calculado utilizando-se a massa específica no estado fresco.

4.1.1.2. Massa específica e teor de ar incorporado

Os valores de massa específica e teor de ar incorporado dos concretos leves foram determinados segundo as recomendações da NBR 9833 e são apresentados na Tabela 4.1. Os valores da massa específica no estado fresco variaram entre 1583 e 1717 kg/m³, ou seja, cerca de 30 a 40% abaixo dos valores obtidos usualmente para os concretos com agregados tradicionais.

Os valores médios do teor de ar incorporado obtidos para os concretos leves com relações P/C de 0, 5 e 10% foram 2,8, 3,7 e 4,0%, respectivamente.

4.1.1.3. Perda de consistência

A análise da perda de consistência com o tempo dos concretos leves foi realizada segundo uma adaptação da NBR 10342. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os resultados do estudo de perda de consistência dos concretos leves durante as primeiras duas horas após a mistura dos materiais.

Verificou-se que todas as dosagens estudadas apresentaram comportamento semelhante, ao longo das duas primeiras horas após mistura, com valores de índice de consistência (NBR 7215) acima de 170 mm, após a primeira hora e acima de 155 mm ao final da análise. O valor do índice de consistência dos concretos leves ao fim da primeira hora pode ser considerado satisfatório, observando-se a trabalhabilidade necessária para a produção de elementos pré-fabricados.

FIGURA 4.1. Perda de consistência dos concretos sem SB

FIGURA 4.2. Perda de consistência dos concretos com relação P/C de 5%

FIGURA 4.3. Perda de consistência dos concretos com relação P/C de 10%

4.1.2. Propriedades no estado endurecido

4.1.2.1. Resistência à compressão e massa específica

A resistência à compressão dos concretos leves foi determinada segundo as recomendações da NBR 5739, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, nas idades de 8 e 12 horas e 1, 7, 28 e 63 dias. Para cada dosagem e idade, foram moldados 5 corpos-de-prova. A massa específica do concreto leve, no estado seco, foi determinada segundo as recomendações da NBR 9778 para concretos leves com idade de 7 dias, utilizando-se corpos-de-prova com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada tipo de concreto. Os valores obtidos de resistência à compressão e massa específica seca dos concretos leves são apresentados na Tabela 4.2.

TABELA 4.2. Resistência à compressão e massa específica dos concretos leves

Traço	P/C (%)	Resistência à compressão (MPa)						Massa específica (kg/m ³)
		8 horas	12 horas	1 dia	7 dias	28 dias	63 dias	
1	0	20,7	32,2	40,4	51,9	53,6	53,7	1605
	5	15,7	29,3	39,3	50,0	50,0	51,2	1585
	10	6,6	23,3	33,6	48,5	47,6	48,0	1593
2	0	15,6	28,0	36,5	48,8	50,0	51,2	1573
	5	11,2	25,8	36,0	46,5	47,3	48,4	1554
	10	5,2	20,3	35,6	45,2	45,2	46,5	1565
3	0	9,8	22,8	32,0	45,2	45,9	48,2	1532
	5	7,8	21,3	32,0	43,3	44,0	45,5	1548
	10	4,6	18,1	32,0	43,3	43,5	45,5	1558
4	0	6,9	19,1	28,8	42,7	43,0	46,2	1482
	5	6,6	19,7	30,1	41,9	42,9	43,2	1520
	10	3,8	15,9	30,1	41,2	42,0	44,3	1527
5	0	4,8	16,0	25,0	39,7	39,5	43,8	1460
	5	4,1	15,6	25,8	39,5	38,9	40,5	1505
	10	3,0	13,5	30,3	39,5	41,0	43,3	1510

Comparado aos concretos tradicionais que, usualmente, apresentam valores de massa específica próximos a 2300 kg/m³, os concretos leves apresentaram redução dos valores da massa específica entre 30 e 37 %.

A Figura 4.4 apresenta a relação entre a resistência à compressão aos 7 dias e a massa específica dos concretos leves. Observa-se que para os mesmos níveis de resistência à compressão, os concretos leves com SB apresentaram um pequeno aumento dos valores da massa específica, em relação aos concretos sem SB.

Analisando o desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos nas primeiras 24 horas (Tabela 4.2), observa-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram retardamento do aumento dos valores da resistência à compressão em comparação aos concretos sem SB, principalmente nas dosagens com maior consumo de cimento. Esse efeito, que foi mais pronunciado para a idade de 8 horas, pode ser atribuído, principalmente, ao aumento do tempo de pega da pasta de cimento modificada com SB. Observa-se, também, que todas as dosagens analisadas apresentaram valores de resistência à compressão com 12 horas de idade acima de 15

MPa (com exceção da dosagem 5 com P/C de 10%), valor que pode ser considerado satisfatório para a desmoldagem da grande maioria das tipologias de peças pré-fabricadas esbeltas.

FIGURA 4.4. Relação entre resistência à compressão aos 7 dias e massa específica dos concretos leves

Nos resultados apresentados na Tabela 4.2 observa-se que os valores da resistência à compressão dos concretos leves foram semelhantes entre as idades de 7 e 63 dias, indicando, assim, que aos 7 dias os concretos leves apresentam estabilização dos valores dessa propriedades. Por isso, a idade de 7 dias foi adotada como característica para determinação das demais propriedades dos concretos leves no estado endurecido.

Considera-se a estabilização dos valores de resistência à compressão aos 7 dias de idade uma característica dos concretos com agregados leves, pois, normalmente, aos 7 dias de idade, os valores da resistência à compressão da matriz de cimento ultrapassam os valores da resistência à compressão do agregado, principalmente com a utilização de cimento da alta resistência inicial. Desse modo, a resistência final do concreto não se beneficia na mesma proporção com o aumento da resistência à compressão da matriz de cimento.

Os valores da resistência à compressão dos concretos leves modificados com SB foram ligeiramente inferiores aos obtidos para os concretos sem SB, com exceção da dosagem 5. Para concretos com 7 dias de idade, esta redução foi, em média, de 3% para

P/C de 5% e de 4,4% para P/C de 10%. Pode-se atribuir essa redução da resistência à compressão ao aumento do teor de ar incorporado nos concretos modificados com SB.

A Figura 4.5 apresenta a relação entre a resistência à compressão aos 7 dias e a relação água/aglomerante (a/agl), no qual se observa que, para os mesmos níveis de resistência à compressão, os concretos leves modificados com SB apresentaram redução significativa dos valores da relação água/aglomerante.

FIGURA 4.5. Comportamento da resistência à compressão aos 7 dias dos concretos leves em função da relação a/agl efetiva

A Figura 4.6 apresenta a relação entre o consumo de cimento e o fator de eficiência⁶ dos concretos leves aos 7 dias de idade. Os valores do fator de eficiência dos concretos leves, que variaram entre 26 e 33 MPa.dm³/kg, foram significativamente superiores aos obtidos para concretos tradicionais, normalmente entre 15 e 25 MPa.dm³/kg (FERREIRA JUNIOR, 1997).

Os valores do fator de eficiência observados para os concretos leves estão em conformidade com os obtidos em outros estudos, que foram realizados utilizando-se o mesmo tipo de agregado leve e os mesmos níveis de consumo de cimento, como ARMELIN et al. (1994) e EVANGELISTA et al. (1996), que observaram valores médios de fator de eficiência aos 28 dias de 33,6 e de 28,3 MPa.dm³/kg, respectivamente. Além disso, os valores do fator de eficiência obtidos estão próximos

⁶ O Fator de Eficiência é definido por HOLM e BREMNER (1994) e SPITZNER (1994) como a relação “resistência à compressão / massa específica”.

aos observados usualmente para os concretos com agregados leves norte-americanos e europeus, nas mesmas condições de dosagem (SEABROOK e WILSON, 1988; SARKAR et al, 1992; WILSON e MALHOTRA, 1988; AİTCIN, 2000; VIEIRA, 2000).

FIGURA 4.6. Relação entre fator de eficiência aos 7 dias e consumo de cimento dos concreto leves

Analisando a relação entre a resistência à compressão aos 7 dias e o consumo de cimento, apresentada na Figura 4.7, verifica-se que, para os mesmos níveis de resistência à compressão, o consumo de cimento dos concretos leves modificados com SB foi 6%, em média, superior aos valores observados nos concretos leves sem SB.

FIGURA 4.7. Relação entre resistência à compressão e consumo de cimento para concretos com 7 dias.

Durante a realização das análises experimentais, observou-se que as rupturas dos concretos leves submetidos à compressão foram mais frágeis com o aumento dos valores da resistência à compressão. Quando se submete o concreto com massa específica normal à tensão de compressão, a propagação das fissuras normalmente ocorre na matriz de cimento ou na interface agregado-matriz, pois, geralmente, o agregado mostra-se mais resistente do que a matriz de cimento. Este processo absorve uma considerável quantidade de energia. Segundo ZHANG e GJØRV (1991a), nos concretos com agregados leves, tipicamente menos resistentes que a matriz de cimento, a propagação das fissuras ocorre, normalmente, nos agregados, ocasionando um acúmulo de tensões na matriz de cimento, provocando, assim, uma ruptura brusca do concreto. Isto possivelmente explique a ruptura mais frágil dos concretos leves, em comparação aos concretos tradicionais, com o aumento da resistência à compressão.

O coeficiente de variação observado para os valores de resistência à compressão dos concretos leves aos 7 dias foi de 4%, em média, indicando assim uma dispersão maior do que a normalmente observada para os concretos tradicionais, que apresentam valores de coeficiente de variação, em média, de 2% (AGNESINI e SILVA, 1997a).

4.1.2.2. Resistência à tração

Os valores de resistências à tração por compressão diametral e de resistência à tração na flexão dos concretos leves foram determinados segundo as recomendações da NBR 7222 e da NBR 12142, respectivamente. A resistência à tração por compressão diametral foi determinada para os concretos leves nas idades de 1, 7, 28 e 63 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A resistência à tração na flexão foi determinada, para concretos leves, nas idades 1, 7 e 63 dias, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos com 150 mm de altura, 150 mm de largura e 500 mm de comprimento. Foram moldados 3 corpos-de-prova para cada dosagem e idade. Os valores de resistências à tração na flexão e à tração por compressão diametral são apresentados na Tabela 4.3.

Percebe-se nos resultados apresentados na Tabela 4.3 que, para todas as dosagens e idades estudadas, os concretos modificados com SB apresentaram aumento dos valores de resistência à tração, tanto na compressão diametral quanto na flexão, em

comparação aos concretos leves sem SB. Observa-se, ainda, que essa melhoria de desempenho da resistência à tração foi crescente, com o aumento da relação P/C.

TABELA 4.3. Valores da resistência à tração dos concretos leves

<i>Traço</i>	<i>P/C (%)</i>	<i>Resistência à tração por compressão diametral (MPa)</i>				<i>Resistência à tração na flexão (MPa)</i>		
		<i>1 dia</i>	<i>7 dias</i>	<i>28 dias</i>	<i>63 dias</i>	<i>1 dia</i>	<i>7 dias</i>	<i>63 dias</i>
1	0	2,9	4,0	4,1	4,3	4,3	5,3	5,9
	5	2,9	3,9	4,1	4,4	4,3	5,9	6,4
	10	3,1	4,1	4,4	4,6	4,7	6,6	6,7
2	0	2,8	3,7	4,0	4,2	4,1	5,0	5,0
	5	2,9	3,8	3,9	4,2	4,0	5,5	6,0
	10	3,0	4,0	4,2	4,4	4,3	5,8	6,4
3	0	2,7	3,3	3,8	3,9	3,7	4,3	4,8
	5	2,8	3,6	3,8	4,0	3,6	4,8	5,6
	10	2,9	3,9	4,1	4,3	4,0	5,3	6,1
4	0	2,6	3,0	3,6	3,8	3,4	3,8	4,4
	5	2,8	3,5	3,7	3,9	3,4	4,6	5,4
	10	2,9	3,8	3,9	4,2	3,7	4,9	5,7
5	0	2,6	2,7	3,5	3,6	3,2	3,3	3,9
	5	2,7	3,4	3,5	3,7	3,1	4,3	5,0
	10	2,8	3,7	3,8	4,1	3,5	4,6	5,4

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam as relações entre a resistência à tração, por compressão diametral e na flexão, e a resistência à compressão dos concretos leves. Para efeito de comparação, foram incorporados nesses gráficos as curvas obtidas segundo as equações⁷ apresentadas por SLATE et al. (1986) e ACI 318 (1992), utilizadas para a estimativa do valor da resistência à tração do concreto leve em função dos valores da resistência à compressão.

Analisando a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 7 dias de idade, apresentada na Figura 4.8, verifica-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram um aumento expressivo dos valores de resistência à tração, em relação aos concretos leves sem SB, principalmente para as dosagens com menor consumo de cimento. Para os concretos leves com 7 dias

⁷ Tabela 1.4 do Capítulo 01 – Concreto Leve.

de idade e consumo de cimento em torno de 450 kg/m^3 , houve um aumento médio dos valores da resistência à tração por compressão diametral de 23 e 35% para os concretos com as relações P/C de 5 e 10%, respectivamente, em comparação aos concretos leves sem SB. Observa-se, ainda, que os valores da resistência à tração por compressão diametral obtidos para os concretos leves modificados com SB estão acima das estimativas apresentadas por SLATE et al. (1986) e ACI 318 (1992). Todavia os concretos leves sem SB, com resistência à compressão abaixo de 44 MPa, apresentaram valores da resistência à tração abaixo dos valores estimados, utilizando-se a equação recomendada pelo ACI 318 (1992).

FIGURA 4.8. Relação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão para concretos leves com 7 dias de idade

FIGURA 4.9. Relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão para concretos leves com 7 dias de idade

Analisando a relação ‘resistência à tração por compressão diametral / resistência à compressão’ para os concretos leves com 7 dias de idade, observam-se os valores médios de 7, 8 e 9% para concretos leves com as relações P/C de 0, 5 e 10%, respectivamente.

Nos resultados apresentados na Figura 4.9, observa-se que houve um aumento expressivo dos valores de resistência à tração na flexão dos concretos leves modificados com SB com 7 dias de idade, em comparação aos concretos leves sem SB. Esse aumento foi, em média, de 16 e 26% para concretos leves com as relações P/C de 5 e 10%, respectivamente.

A melhora de desempenho da resistência à tração dos concretos leves modificados com SB, em relação aos concretos leves sem SB, pode ser atribuída ao efeito do látex de estireno butadieno que reduz a relação água/aglomerante do concreto, aumenta a resistência à tração da matriz de cimento e melhora a adesão entre a matriz de cimento e o agregado (OHAMA, 1998).

4.1.2.3. Módulo de deformação e diagrama tensão-deformação

A determinação dos valores do módulo de deformação tangente inicial e do diagrama tensão-deformação dos concretos leves foi realizada, segundo as recomendações da NBR 8522, para concretos nas idades de 3, 7 e 63 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada dosagem e idade foram analisados 3 corpos-de-prova. O carregamento foi constante de $0,50 \pm 0,05$ MPa/s e o valor do módulo de deformação foi calculado utilizando-se a tensão correspondente a 30% do carregamento último. A Tabela 4.4 apresenta os resultados de módulo de deformação obtidos para os concretos leves.

Observa-se nos resultados apresentados na Tabela 4.4 que os valores do módulo de deformação obtidos para os concretos leves foram significativamente inferiores aos normalmente observados para os concretos com agregados tradicionais, para os mesmos níveis de resistência à compressão. Essa redução dos valores do módulo de deformação está em conformidade com estudos anteriores (ARMELIN et al., 1994; GOMES NETO, 1998) e deve-se essencialmente à baixa resistência à compressão dos agregados leves, cerca de 10% do valor observado para os agregados tradicionais, como o basalto, por exemplo. Observa-se, também, que a diferença entre os valores do módulo de deformação obtidos aos 3 e 63 dias foi de aproximadamente 20%.

TABELA 4.4. Valores do módulo de deformação tangente inicial dos concretos leves nas idades de 3, 7 e 63 dias

Traço	P/C (%)	Módulo de deformação tangente inicial (NBR 8522) (GPa)		
		3 dias	7 dias	63 dias
1	0	21,8	22,6	24,8
	5	20,3	21,6	23,6
	10	17,8	20,3	22,7
2	0	20,2	21,8	24,5
	5	19,7	21,1	23,0
	10	17,8	19,5	22,7
3	0	18,4	20,0	23,5
	5	18,2	19,8	22,7
	10	17,1	18,9	21,8
4	0	17,7	19,5	23,2
	5	18,0	19,0	21,5
	10	16,9	18,5	20,2
5	0	16,5	18,7	21,7
	5	17,4	17,9	20,7
	10	16,8	18,2	20,5

Os valores do módulo de deformação dos concretos com e sem SB foram semelhantes, principalmente para as dosagens com baixo consumo de cimento, como pode ser observado na Figura 4.10, que apresenta a relação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação dos concretos leves aos 7 dias de idade.

A Tabela 4.5 apresenta uma comparação entre os valores do módulo de deformação dos concretos leves obtidos experimentalmente (NBR 8522) e os obtidos segundo as equações indicadas pelo NS 3473 (Norwegian Concrete Code), ACI 318 (American Concrete Institute), BS 8110 (British Standard) e CEB – Comité Euro-Internacional du Béton (1978), apresentadas na Tabela 4.6. Para cálculo dos valores do módulo de deformação, foram adotadas as relações apresentadas nas equações 4.1a e 4.1b. A equação recomendada pelo ACI destina-se a concretos com resistência à compressão abaixo de 41 MPa, entretanto foi incorporada ao estudo, para efeito de comparação.

FIGURA 4.10. Relação entre resistência à compressão e módulo de deformação dos concretos leves aos 7 dias de idade.

TABELA 4.5. Valores experimentais e calculados do módulo de deformação dos concretos leves

Traço	P/C (%)	Resistência compressão aos 7 dias (MPa)	Massa específica (kg/m ³)	Valores obtidos do módulo de deformação (GPa) NBR 8522	Módulo de deformação calculado (GPa)			
					NS 3473	ACI 318	BS 8110	CEB
1	0	51,9	1605	22,6	17,0	18,9	14,7	15,9
	5	50,0	1585	21,6	16,5	18,2	14,2	15,4
	10	48,5	1593	20,3	16,5	18,1	14,2	15,4
2	0	48,8	1573	21,8	16,2	17,8	13,9	15,0
	5	46,5	1554	21,1	15,7	17,0	13,4	14,5
	10	45,2	1565	19,5	15,7	17,0	13,4	14,5
3	0	45,2	1532	20,0	15,2	16,4	12,9	13,9
	5	43,3	1548	19,8	15,2	16,3	13,0	14,1
	10	43,3	1558	18,9	15,4	16,5	13,2	14,2
4	0	42,7	1482	19,5	14,2	15,2	11,8	12,8
	5	41,9	1520	19,0	14,7	15,6	12,4	13,4
	10	41,2	1527	18,5	14,7	15,6	12,4	13,5
5	0	39,7	1460	18,7	13,6	14,3	11,3	12,2
	5	39,5	1505	17,9	14,2	15,0	11,9	13,0
	10	39,5	1510	18,2	14,3	15,0	12,0	13,0

TABELA 4.6. Equações para cálculo do módulo de deformação

<i>NORMA</i>	<i>Equação *</i>	<i>Observações</i>
NS 3473 (1992)	$E_c = 9.5 \cdot f_{ck}^{0.3} \cdot (\gamma / 2400)^{1.5}$ (GPa)	$f_{ck} < 85$ MPa
ACI 318 (1992)	$E_c = 0,043 \cdot \gamma^{1.5} \cdot f_c^{0.5}$ (MPa)	$f_c < 41$ MPa
BS 8110 Part.2 (1985)	$E_c = 1,7 \cdot (\gamma / 1000)^2 \cdot f_{ck}^{0.3}$ (GPa)	-
CEB (1978)	$E_c = 1,6 \cdot \gamma^2 \cdot (f_{ck} + 8)^{0.33} \cdot 10^{-6}$ (GPa)	-

* E_c = módulo de deformação; γ = massa específica (kg/m³); f_c = res. compressão (150 x 300mm - cilindro); f_{ck} = res. compressão (100 x 200mm - cilindro); f_{ck} = res. compressão (cubo - 100 mm³).

$$f_c = 0,9 \cdot f_{ck} \quad (a) \quad f_{ck} = 1,1 \cdot f_{ck} \quad (b) \quad (4.1) \quad (\text{ZHANG e GJ}\phi\text{RV, 1991a})$$

Nos resultados apresentados na Tabela 4.5, observa-se que todas as equações utilizadas subestimaram o valor do módulo de deformação para os concretos leves em estudo. Os valores médios da diferença entre os valores experimentais e os obtidos pelas equações foram: 18% para ACI 318 (1992), 24% para NS 3473 (1992), 30% para CEB (1978) e 35% para BS 8110 (1985). Dessa forma, observa-se que a equação apresentada pelo ACI, dentre as analisadas, apresenta-se como a mais recomendada para fornecer uma estimativa do valor do módulo de deformação dos concretos leves em estudo. Deve-se ressaltar que as equações utilizadas referem-se a estudos realizados com agregados leves com propriedades diferentes das analisadas nesta pesquisa, como composição, resistência mecânica, dimensão e textura, e é provável que este seja o motivo das grandes diferenças entre os valores experimentais e os calculados.

Analisando os resultados obtidos para os concretos leves com 7 dias de idade, obteve-se uma expressão que relaciona o valor do módulo de deformação com os valores da resistência à compressão e a da massa específica dos concretos leves em estudo (Equação 4.2).

$$E_c = 0,049 \cdot \gamma^{1.5} \cdot f_c^{0.5} \quad (\text{MPa}) \quad (4.2)$$

Onde: E_c = módulo de deformação;

γ = massa específica (kg/m³);

f_c = resistência à compressão (cilindro com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura).

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os diagramas tensão-deformação para os concretos leves nas dosagens 1 e 5, respectivamente, nas idades de 3, 7 e 63 dias.

Observa-se que os valores de deformação última aumentam com a redução do consumo de cimento e que os valores das deformações dos concretos leves modificados com SB foram, para o mesmo nível de tensão, maiores do que os observados para os concretos leves sem SB.

FIGURA 4.11. Diagrama tensão-deformação para o traço 1 dos concretos leves sem SB (a), com P/C de 5% (b) e com P/C de 10% (c).

FIGURA 4.12. Diagrama tensão-deformação para o traço 5 dos concretos leves sem SB (a), com P/C de 5% (b) e com P/C de 10% (c).

Observa-se, também, que a parte ascendente da curva tensão-deformação apresenta um grande trecho de linearidade, principalmente para a idade de 63 dias. Segundo NEVILLE (1997a), atribuí-se a maior linearidade da curva tensão-deformação dos concretos leves, em comparação aos concretos tradicionais, à maior compatibilidade entre os valores do módulo de deformação do agregado e da matriz de cimento.

4.1.2.4. Diagrama tensão-deformação com deformação controlada

A determinação dos diagramas tensão-deformação com deformação controlada foi realizada segundo uma adaptação da NBR 8522, para concretos leves na idade de 7 dias e nas dosagens 1, 3 e 5, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada dosagem e idade, foram moldados 3 corpos-de-prova. A taxa de deformação utilizada foi de 0,005 mm/(m.s).

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os diagramas tensão-deformação dos concretos leves. Observa-se um comportamento distinto da parte descendente do diagrama entre os concretos leves sem e com SB. Os concretos leves modificados com SB apresentaram o trecho descendente do diagrama com menor inclinação do que o observado para os concretos leves sem SB, indicando, assim, a maior tenacidade dos concretos leves modificados com SB. Este fato pode ser atribuído ao aumento dos valores da resistência à tração dos concretos leves modificados com SB, em relação aos sem SB.

FIGURA 4.13. Diagrama tensão-deformação com deformação controlada dos concretos leves (traço 1)

FIGURA 4.14. Diagrama tensão-deformação com deformação controlada dos concretos leves (traço 3)

FIGURA 4.15. Diagrama tensão-deformação com deformação controlada dos concretos leves (traço 5)

Analisando a transição entre os trechos ascendente e descendente dos diagramas, observa-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram processo de fissuração mais lento durante o carregamento último, em relação aos concretos leves sem SB, por apresentarem transição mais longa.

4.1.2.5. Absorção de água por imersão e índice de vazios

A determinação dos valores de absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos leves foi realizada segundo as recomendações da NBR 9778 para os concretos leves com idades de 7 e 28 dias, utilizando corpos-de-prova cilíndricos com

100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Foram analisados 3 corpos-de-prova para cada tipo e idade do concreto. Os valores de absorção de água por imersão e de índice de vazios são apresentados na Tabela 4.7.

TABELA 4.7. Absorção de água por imersão e índice de vazios dos concretos leves

Traço	P/C (%)	Absorção de Água (%)		Índice de vazios (%)	
		7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
1	0	4,5	6,6	7,2	11,6
	5	3,2	3,5	5,0	5,8
	10	1,8	2,1	3,4	3,8
2	0	4,5	6,4	7,3	9,4
	5	3,0	3,4	4,7	5,3
	10	1,9	2,1	3,6	3,9
3	0	4,5	6,3	7,0	9,1
	5	3,5	4,0	5,4	6,1
	10	2,0	2,3	3,5	3,9
4	0	4,6	6,4	6,9	8,7
	5	3,4	3,7	5,4	5,9
	10	2,1	2,4	4,0	4,5
5	0	4,7	6,4	6,8	9,7
	5	3,6	4,0	5,5	6,2
	10	2,1	2,5	4,5	5,0

Observou-se que os concretos leves sem SB apresentaram valores médios de absorção de água aos 28 dias de 6,5%, valores considerados adequados de acordo com as especificações da NBR 11173, que limita o valor de absorção de água das argamassas estruturais em 8%. Além disso, verificou-se a redução significativa dos valores de absorção de água nos concretos leves modificados com SB, em comparação aos sem SB, com valores médios de absorção de água aos 28 dias de 3,7% para P/C de 5% e 2,3% para P/C de 10%.

Analisando ainda a Tabela 4.7, percebe-se que a utilização de SB promove a redução da quantidade de vazios permeáveis dos concretos leves e que este efeito é beneficiado com o aumento da relação P/C.

A redução dos valores de absorção de água e dos vazios permeáveis dos concretos leves modificados com SB pode ser atribuída aos seguintes fatores: coalescência do polímero nos poros capilares com conseqüente redução da quantidade e

do diâmetro dos poros; formação do filme de polímero na face externa do material e redução de relação água/aglomerante (OHAMA, 1998).

A Figura 4.16 apresenta a relação entre a absorção de água aos 28 dias e o consumo de cimento dos concretos leves. Observa-se que, para os traços estudados, o consumo de cimento tem pouco influência nos valores da absorção de água por imersão dos concretos leves.

FIGURA 4.16. Relação entre a absorção de água por imersão aos 28 dias e o consumo de cimento dos concretos leves

Os valores médios de absorção de água e índice de vazios permeáveis dos concretos leves sem SB aos 28 dias, 6,5% e 9,7%, respectivamente, foram muito próximos dos observados por FERREIRA JUNIOR (1997), que analisou concretos de alto desempenho com agregados tradicionais (CAD), com características de dosagem semelhantes aos concretos leves em estudo, demonstrando, assim, que não há aumento da permeabilidade dos concretos com a utilização dos agregados leves nacionais.

4.1.2.6. Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade dos concretos leves foi realizada segundo as recomendações da NBR 9779, para concretos leves na idade de 7 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada dosagem e idade foram analisados 3 corpos-de-prova. Os resultados dessa análise experimental são apresentados na Tabela 4.8 e nas Figuras 4.17 e 4.18.

TABELA 4.8. Absorção de água por capilaridade dos concretos leves.

Traço	P/C (%)	Absorção Capilar (g/cm^2)			Ascensão capilar média 72 h (mm)
		24h	48h	72h	
1	0	0,30	0,36	0,38	18
	5	0,15	0,17	0,19	13
	10	0,13	0,16	0,18	12
2	0	0,30	0,34	0,37	18
	5	0,18	0,21	0,24	14
	10	0,14	0,15	0,17	12
3	0	0,29	0,35	0,38	19
	5	0,23	0,24	0,25	15
	10	0,14	0,18	0,19	13
4	0	0,30	0,35	0,39	19
	5	0,22	0,24	0,26	14
	10	0,13	0,17	0,19	13
5	0	0,32	0,37	0,40	21
	5	0,20	0,25	0,26	15
	10	0,14	0,18	0,20	13

FIGURA 4.17. Relação entre absorção de água por capilaridade (72h) e o consumo de cimento dos concretos leves

Analisando os resultados apresentados, observa-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram valores de absorção de água por capilaridade e ascensão capilar significativamente inferiores aos obtidos para os concretos leves sem SB. Estes resultados, juntamente com os obtidos na análise de absorção de água por imersão, indicam que a utilização do SB reduz significativamente a permeabilidade dos concretos leves.

FIGURA 4.18. Valores da ascensão capilar média observada nos concretos leves

4.1.2.7. Coeficiente de permeabilidade

A análise do coeficiente de permeabilidade dos concretos leves foi realizada segundo uma adaptação da NBR 10786, para concretos leves na idade de 28 dias, nas dosagens 1, 3 e 5, utilizando corpos-de-prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Para cada dosagem e idade, foram analisados 2 corpos-de-prova.

Em todos os corpos-de-prova analisados, não foi observada a saída de água pela face inferior, o que impossibilitou a determinação do coeficiente de permeabilidade para estes materiais. Após a aplicação das 400 horas de água sob pressão em uma das faces do corpo-de-prova, este foi rompido para análise interior e não foi possível determinar a profundidade da penetração da água, pois todo o interior do corpo-de-prova apresentava umidade semelhante.

Dessa forma, com os equipamentos disponíveis não foi possível obter resultados conclusivos sobre o coeficiente de permeabilidade dos concretos leves.

4.1.2.8. Resistência à penetração de cloretos

A determinação da resistência à penetração de íons cloretos dos concretos leves foi realizada segundo o procedimento não normalizado descrito no Capítulo 3, para concretos leves na idade de 28 dias, nas dosagens 1, 3 e 5, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para cada dosagem, foram utilizados 3 corpos-de-prova.

A Figura 4.19 apresenta as curvas da relação entre corrente elétrica e tempo de análise para os concretos leves. Essas curvas possibilitam a determinação do tempo de corrosão dos corpos-de-prova de concreto leve, que pode ser definido como o tempo entre o início do ensaio, que consiste na imersão dos corpos-de-prova na solução de NaCl e na aplicação da diferença de potencial de 12V (DC), e o instante em que ocorre o aumento da corrente elétrica do sistema.

FIGURA 4.19. Relação ‘corrente elétrica – tempo’ observada para os concretos leves

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.19, observa-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram tempo de corrosão maior do que o observado para os sem SB, demonstrando, assim, que os concretos leves modificados com SB apresentaram maior proteção à armadura ao ataque de íons cloreto, em comparação ao concreto leve sem SB.

Observa-se, na Figura 4.20, que o aumento médio do tempo de corrosão dos concretos leves modificados com SB, em comparação aos sem SB, foi de 45% para P/C de 5% e 85% para P/C de 10%. Esse fato pode ser atribuído à redução da permeabilidade dos concretos leves com SB.

FIGURA 4.20. Valores de tempo de corrosão para os concretos leves

Os concretos leves modificados com SB apresentaram valores de corrente elétrica inicial menores do que as observadas nos concreto sem SB, demonstrando, assim, que os concretos leves modificados com SB apresentam maior resistividade elétrica do que os sem SB.

A fissuração dos corpos-de-prova de concreto leve sem SB ocorreu com o aparecimento de fissuras perpendiculares à seção transversal, que provocaram o colapso dos corpos-de-prova. Já nos concretos leves modificados com SB, o processo de fissuração ocorreu com o aparecimento de pequenas fissuras, em direções diferentes, que não provocaram o colapso dos corpos-de-prova.

4.1.2.9. Resistência à agentes químicos

A determinação da resistência à ação de agentes agressivos dos concretos leves foi realizada analisando-se a perda de massa de corpos-de-prova imersos em soluções agressivas, segundo os procedimentos recomendados pela ASTM C 267-96, para concretos leves na idade de 28 dias nas dosagens 1, 3 e 5. Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A análise de perda de massa foi realizada para 1, 7, 14, 28, 56 e 84 dias de imersão nas soluções agressivas. Para cada dosagem e idade de análise, foram moldados 5 corpos-de-prova. A análise foi interrompida quando valores de perda de massa acima de 35% foram atingidos.

Foram utilizadas seis tipos de soluções agressivas para a análise da resistência químico dos concretos leves, sendo elas:

- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) (20%);

- Ácido Clorídrico (HCl) (10%);
- Ácido Acético (CH₃COOH) (10%);
- Hidróxido de Sódio (NaOH) (10%);
- Hipoclorito de Sódio (NaClO) (10%);
- Cloreto de Sódio (NaCl) (20%).

Os corpos-de-prova imersos nas três últimas soluções descritas anteriormente apresentaram variação de massa inferior à 1% aos 84 dias. Dessa forma, são apresentados na Tabela 4.9 apenas os resultados da perda de massa dos corpos-de-prova imersos nas soluções ácidas.

TABELA 4.9. Perda de massa dos corpos-de-prova imersos em soluções ácidas.

<i>Solução Agressiva</i>	<i>Traço</i>	<i>P/C (%)</i>	<i>Perda de massa (%)</i>					
			<i>1 dia</i>	<i>7 dias</i>	<i>14 dias</i>	<i>28 dias</i>	<i>56 dias</i>	<i>84 dias</i>
Ácido Sulfúrico (20%)	1	0	1,8	9,3	35,1	-	-	-
		5	1,2	7,0	23,2	-	-	-
		10	0,8	5,2	19,0	-	-	-
	3	0	1,9	10,8	36,7	-	-	-
		5	1,3	7,1	24,8	-	-	-
		10	0,8	4,8	18,2	-	-	-
	5	0	2,2	11,1	38,3	-	-	-
		5	1,5	8,4	25,5	-	-	-
		10	1,1	4,0	17,1	-	-	-
Ácido Clorídrico (10%)	1	0	0	2,0	6,1	9,0	11,1	13,9
		5	0	1,3	4,5	7,1	9,0	12,2
		10	0	0	1,2	3,2	5,4	7,3
	3	0	0,6	3,1	8,0	11,1	14,2	19,7
		5	0	1,4	3,4	6,6	8,7	11,8
		10	0	0	1,5	2,8	3,8	5,8
	5	0	1,1	3,8	9,2	12,9	16,1	22,2
		5	0	1,2	4,3	7,2	10,0	13,1
		10	0	0	1,9	2,3	3,4	5,1
Ácido Acético (10%)	1	0	0	0	0,5	1,2	3,2	7,2
		5	0	0	0	0,5	0,8	2,0
		10	0	0	0	0,7	1,1	1,1
	3	0	0	1,4	3,2	6,2	9,1	13,1
		5	0	0	0,8	1,8	3,2	6,8
		10	0	0	0	0,4	1,0	2,1
	5	0	0	1,8	4,1	8,0	11,1	16
		5	0	0	1,5	2,1	4,3	8,9
		10	0	0	0	0,7	1,3	3,2

Alguns corpos-de-prova imersos na solução de 20% de ácido sulfúrico apresentaram perda de massa superior a 35% já aos 14 dias de imersão, sendo, assim, interrompida a análise. Observou-se que os corpos-de-prova de concreto leve modificado com SB apresentaram valores de perda de massa significativamente inferiores aos obtidos para os concretos leves sem SB, como pode ser observado na Figura 4.21. Os valores médios da diferença de perda de massa dos concreto leves modificados com SB aos 14 dias, em relação aos concretos leves sem SB, foram de 34% para P/C de 5% e de 51% para P/C de 10%, demonstrando que os concretos leves modificados com SB apresentam resistência ao ataque da solução de ácido sulfúrico superior à dos concretos leves sem SB. A Figura 4.22 apresenta a ilustração dos corpos-de-prova das dosagens 1 e 5 após 14 dias de imersão em solução de ácido sulfúrico.

FIGURA 4.21. Perda de massa das amostras imersas na solução de ácido sulfúrico

Dosagem 1

Dosagem 5

FIGURA 4.22. Amostras após 14 dias de imersão na solução de ácido sulfúrico
(Da esquerda para a direita P/C de 0, 5 e 10%)

Os corpos-de-prova imersos na solução de 10% de ácido clorídrico apresentaram valores máximos de perda de massa de 22% aos 84 dias, conforme pode ser observado na Tabela 4.9 e na Figura 4.23. Os corpos-de-prova de concreto leve modificado com SB apresentaram valores de perda de massa aos 84 dias significativamente inferiores aos obtidos para os concretos leves sem SB. Os valores médios da diferença de perda de massa dos concretos leves modificados com SB, em relação aos sem SB, foram de 26% para P/C de 5% e de 62% para P/C de 10%. A Figura 4.24 apresenta a ilustração dos corpos-de-prova das dosagens 1 e 5 após 84 dias de imersão em solução de ácido clorídrico.

FIGURA 4.23. Perda de massa dos corpos-de-prova imersos na solução de ácido clorídrico

FIGURA 4.24. Amostras após 84 dias de imersão na solução de ácido clorídrico (Da esquerda para a direita P/C de 0, 5 e 10%)

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.9 e na Figura 4.25, observa-se que os corpos-de-prova imersos na solução de 10% de ácido acético apresentaram valores máximos de perda de massa de 16% aos 84 dias e as amostras de concreto leve modificado com SB apresentaram valores de perda de massa significativamente inferiores aos obtidos para as amostras com concreto leve sem SB. Os valores médios de diferença de perda de massa, em relação aos concretos leves sem SB, foram de 66% para P/C de 5% e de 83% para P/C de 10%. A Figura 4.26 apresenta a ilustração dos corpos-de-prova das dosagens 1 e 5, após 84 dias de imersão em solução de ácido acético.

FIGURA 4.25. Perda de massa dos corpos-de-prova imersos na solução de ácido acético

FIGURA 4.26. Amostras após 84 dias de imersão na solução de ácido acético (Da esquerda para a direita P/C de 0, 5 e 10%)

Em uma análise geral dos resultados obtidos, observa-se que os concretos leves com maior consumo de cimento apresentaram melhor desempenho de resistência aos agentes agressivos, quando comparados aos concretos com menor consumo de cimento, e que a utilização de SB aumentou significativamente a resistência dos concretos leves ao ataque das soluções ácidas. Este último fato demonstra que os concretos leves modificados com SB apresentam maior durabilidade em meios agressivos do que os concretos leves tradicionais.

4.1.2.10. Resistência à abrasão por jateamento de areia

A determinação da resistência à abrasão por jateamento de areia dos concretos leves foi realizada segundo uma adaptação da ASTM C 418-90, para concretos leves nas idades de 7 e 63 dias, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos de 30 mm de altura, 200 mm de largura e 200 mm de comprimento. Para cada dosagem e idade, foram moldados 3 corpos-de-prova. Os resultados desta análise experimental são apresentados na Tabela 4.10 e na Figura 4.27.

TABELA 4.10. Resistência à abrasão por jateamento de areia dos concretos leves

Traço	P/C (%)	Resistência à abrasão por jateamento de areia (cm^3/cm^2)	
		7 dias	63 dias
1	0	0,171	0,164
	5	0,157	0,146
	10	0,135	0,129
2	0	0,183	0,176
	5	0,164	0,158
	10	0,148	0,142
3	0	0,221	0,205
	5	0,185	0,180
	10	0,174	0,168
4	0	0,252	0,241
	5	0,223	0,212
	10	0,212	0,211
5	0	0,287	0,264
	5	0,245	0,234
	10	0,238	0,223

FIGURA 4.27. Relação entre resistência à abrasão por jateamento de areia aos 63 dias e consumo de cimento dos concretos leves

As adaptações adotadas no método de análise da resistência à abrasão dos concretos leves foram a redução do tempo de aplicação do jato de areia e o aumento do diâmetro do bico de saída de areia. Essas adaptações foram necessárias para adequar o método de análise ao material analisado, que apresenta baixa resistência à abrasão, quando comparado aos concretos tradicionais. Assim, o objetivo desta análise experimental foi avaliar o desempenho comparativo entre os concretos leves com e sem SB, não podendo ser utilizado para um estudo comparativo com concretos com agregados tradicionais.

Normalmente, os concretos leves não são utilizados em ambientes de alta solicitação abrasiva, como pisos, por exemplo. Entretanto, a análise dessa propriedade mostra-se importante para avaliar o desempenho do concreto leve modificado com SB em relação ao sem SB, para avaliar a atuação do SB nas propriedades dos concretos leves.

Analizando os resultados apresentados na Tabela 4.10 e na Figura 4.27 observa-se que os valores de perda de massa dos concretos leves, submetidos à solicitação de abrasão, diminui significativamente com a redução do consumo de cimento, consequência direta do aumento do teor de agregados leves do concreto. Observa-se, também, que os concretos leves modificados com SB apresentaram redução significativa dos valores de perda de massa em relação aos concretos leves sem SB.

4.1.2.11. Resistência ao impacto

A determinação da resistência ao impacto dos corpos-de-prova de concreto leve foi realizada segundo o procedimento não normatizado, descrito no Capítulo 3, que consiste basicamente na medição da energia necessária para fissurar ou romper um corpo-de-prova prismático de concreto por meio da queda de uma esfera de massa conhecida. Este ensaio foi realizado para concretos leves nas idades de 7 e 63 dias, nas dosagens 1, 3 e 5, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos de 75 mm de altura, 300 mm de largura e 300 mm de comprimento. Para cada dosagem e idade, foram moldados 4 corpos-de-prova. Os resultados dessa análise experimental são apresentados na Tabela 4.11 e na Figura 4.28.

TABELA 4.11. Resistência ao impacto dos concretos leves

<i>Traço</i>	<i>P/C (%)</i>	<i>Altura de queda (cm)</i>		<i>Resistência ao impacto (J)</i>	
		<i>7 dias</i>	<i>63 dias</i>	<i>7 dias</i>	<i>63 dias</i>
1	0	74	76	43,5	44,7
	5	82	85	48,2	50,0
	10	88	93	51,7	54,7
3	0	78	82	45,9	48,2
	5	85	90	50,0	52,9
	10	92	96	54,1	56,5
5	0	84	86	49,4	50,6
	5	90	94	52,9	55,3
	10	97	101	57,1	59,4

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4.11, observa-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram valores de resistência ao impacto maiores do que os observados para os sem SB. O aumento médio dos valores foi de 10% para os concretos leves com 5% de SB e de 18% para os concretos leves com 10% de SB.

FIGURA 4.28. Relação entre resistência ao impacto aos 63 dias e consumo de cimento dos concretos leves.

Os valores de resistência ao impacto dos concretos leves em estudo foram inferiores aos observados no estudo realizado por FERREIRA JUNIOR (1997), que utilizou o mesmo método de avaliação da resistência ao impacto para concretos com agregados tradicionais ($D_{\text{máx}} = 9,5\text{mm}$), com parâmetros de dosagem semelhantes aos concretos leves em estudo. No estudo de FERREIRA JUNIOR (1997), foram obtidos valores de resistência ao impacto variando entre 69 e 76 J para concretos com 28 dias de idade, demonstrando, assim, que o concreto leve apresenta resistência ao impacto, para o método e dosagem utilizados, inferior aos concretos com agregados tradicionais. Esse fato indica a importância da utilização do polímero SB nos concreto leves para melhorar o desempenho dessa propriedade.

4.1.2.12. Retração por secagem

A determinação da retração por secagem dos concretos leves foi realizada segundo as recomendações da ASTM C 157-93. Para cada dosagem foram moldados 3 corpos-de-prova prismáticos de 75 mm de altura, 75 mm de largura e 285 mm de comprimento. As medições dos valores da retração por secagem foram realizadas aos 1, 4, 7, 14, 28, 56, 112, 224, 360 e 448 dias de idade dos corpo-de-prova.

As Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 apresentam os gráficos com o desenvolvimento da retração por secagem dos concretos leves com as relações de P/C de 0, 5 e 10%, respectivamente. Verifica-se nos resultados obtidos que os valores da retração por secagem dos concretos leves foram superiores aos normalmente obtidos para concretos

com massa específica normal e apresentam estabilização após os 200 dias de idade. Os altos valores de retração por secagem dos concretos leves estão diretamente relacionados ao uso do agregado leve e ao alto consumo de cimento, necessários para a obtenção das propriedades desejadas.

FIGURA 4.29. Retração por secagem dos concretos leves sem SB

FIGURA 4.30. Retração por secagem dos concretos leves com P/C de 5%

FIGURA 4.31. Retração por secagem dos concretos leves com P/C de 10%

Analisando-se os resultados, observa-se que os concretos leves sem SB apresentaram valores de retração por secagem inferiores aos obtidos para os concretos leves modificados com SB nos primeiros 100 dias, consequência provável da duração da cura úmida de 1 dia para concretos com SB e de 27 dias para concretos sem SB. Entretanto, para idades mais avançadas, os concretos leves sem SB apresentaram valores de retração por secagem similares aos obtidos para os concretos leves com P/C de 5% e superiores aos obtidos para os concretos leves com P/C de 10% de SB, mesmo sob condições de cura diferentes. Observa-se, também, que os concretos leves sem SB apresentaram maior variação dos valores de retração por secagem em função do consumo de cimento, comparados aos concretos leves modificados com SB.

Os valores de retração por secagem obtidos para os concretos leves estão em conformidade com os valores máximos e mínimos previstos por HOLM e BREMNER (1994). Segundo esses pesquisadores, o valor da retração por secagem dos concretos leves estruturais apresenta variação entre 500×10^{-6} a 1000×10^{-6} aos 400 dias de idade.

A previsão do valor final da retração por secagem pode ser obtida utilizando-se a formulação apresentada no manual 209R-92 do ACI, Equação 4.3, no qual S_t representa o valor da retração por secagem ($\times 10^{-6}$) aos t dias e S_{ult} representa o valor final estimado para a retração por secagem ($\times 10^{-6}$). Nessa equação, assume-se que os corpos-de-prova do concreto foram submetidos à cura úmida por 7 dias.

$$S_{ult} = ((35 + t) / t) \times S_t \quad (4.3)$$

A data (t) utilizada para estimar o valor final da retração por secagem foi 56 dias, conforme indicação do manual 209R-92 do ACI, e os valores teóricos e experimentais são apresentados na Figura 4.32. Observa-se que os valores teóricos e experimentais da retração por secagem para os concretos leves sem SB foram semelhantes, demonstrando, assim, que a Equação 4.3 fornece uma boa estimativa do valor final da retração por secagem para este material, mesmo sob cura úmida nos primeiros 28 dias, valor este superior aos previsto na Equação 4.3.

FIGURA 4.32. Retração por secagem dos concretos leves: relação entre os valores experimentais e teóricos

Todavia, com relação aos concretos leves modificados com SB, os valores teóricos obtidos com a Equação 4.3 foram consideravelmente superiores aos obtidos experimentalmente. Esse fato pode ser atribuído ao comportamento do desenvolvimento da retração por secagem nas primeiras idades desse material, influenciada, principalmente, pelo tipo de cura, em que, aos 56 dias de idade, os concretos leves modificados com SB apresentaram valores de retração por secagem superiores aos apresentados pelos concretos leves sem SB, ocasionando, assim, valores teóricos superestimados em relação aos experimentais.

4.2. Análise experimental de elementos construtivos esbeltos pré-fabricados submetidos à flexão

Observou-se no processo de produção das peças com os concretos leves, que os métodos de mistura, moldagem, adensamento e cura adotados foram adequados. Os concretos leves apresentaram propriedades no estado fresco, tais como consistência e coesão, adequadas aos processos de moldagem e adensamento utilizados, não sendo observados os fenômenos de exudação e segregação.

As peças moldadas com concreto leve apresentaram valores médios de peso próprio de 90 kg, enquanto a mesma peça moldada com concreto tradicional apresentaria valores médios de 135 kg. Essa redução de peso próprio com a utilização dos concretos leves beneficiou significativamente o transporte das peças.

As Figuras 4.33 a 4.38 apresentam os diagramas força-deslocamento para as peças analisadas. Nesses diagramas, são apresentados os valores dos deslocamentos observados nos seis defletômetros utilizados (Figura 3.11 – Capítulo 3).

FIGURA 4.33. Diagrama força-deslocamento (Traço 1-P/C = 0%)

FIGURA 4.34. Diagrama força-deslocamento (Traço 1-P/C = 5%)

FIGURA 4.35. Diagrama força-deslocamento (Traço 1-P/C = 10%)

FIGURA 4.36. Diagrama força-deslocamento (Traço 5-P/C = 0%)

FIGURA 4.37. Diagrama força-deslocamento (Traço 5-P/C = 5%)

FIGURA 4.38. Diagrama força-deslocamento (Traço 5-P/C = 10%)

A Tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos na análise experimental das peças pré-fabricadas. Para facilitar a análise do comportamento das peças submetidas à flexão, as Figuras 4.39(a) e 4.39(b) apresentam os diagramas força-deslocamento absolutos para as peças analisadas. Nesses diagramas, são apresentados os deslocamentos absolutos observados no centro da peça, obtidos pela média dos valores apresentados nos defletômetros D3 e D4, descontando-se os deslocamentos dos apoios (defletômetros D1 e D6) (Figura 3.11 – Capítulo 3).

TABELA 4.12. Resultados da análise experimental das peças pré-fabricadas

<i>Propriedade</i>	<i>Tipo de concreto leve</i>					
	<i>Dosagem 1</i>			<i>Dosagem 5</i>		
	<i>P/C=0%</i>	<i>P/C=5%</i>	<i>P/C=10%</i>	<i>P/C=0%</i>	<i>P/C=5%</i>	<i>P/C=10%</i>
Força para 1ª fissura (kN)	5,50	6,28	6,80	3,66	4,60	5,43
Deslocamento para 1ª fissura (mm)	3,21	4,03	5,55	2,83	3,20	4,38
Momento fletor para 1ª fissura (kN.m)	2,48	2,83	3,06	1,65	2,07	2,44
Força para deslocamento de l/300 (kN) ¹	6,87	7,59	7,60	5,90	6,25	6,78
Momento fletor para deslocamento de l/300 (kN.m)	3,09	3,42	3,42	2,66	2,81	3,05
Tenacidade l/300 (kN.mm) ²	50,21	53,36	50,19	38,97	43,71	45,59

⁽¹⁾ Deslocamento absoluto no centro da peça;

⁽²⁾ Tenacidade calculada pela área do diagrama força-deslocamento absoluto até l/300.

^(*) l/300 = 9 mm;

Com relação ao início da fissuração das peças, observa-se que a força necessária para o aparecimento da primeira fissura foi maior nas peças com concreto leve modificado com SB, em comparação à observada nas peças com concreto leve sem SB. Entretanto esse efeito foi mais significativo nas peças produzidas com concreto leve da dosagem 5 (consumo de cimento de 440 kg/m³), que apresentaram aumento da força para primeira fissura de 26% para o concreto com P/C de 5% e de 48% para o concreto com P/C de 10%, em relação à peça moldada com concreto sem SB. Nas peças com concreto leve da dosagem 1 (consumo de cimento de 700 kg/m³) esse aumento foi de 14% para o concreto com P/C de 5% e de 23% para o concreto com P/C de 10%.

Analisando os deslocamentos absolutos no momento do aparecimento da primeira fissura das peças, observa-se que para as duas dosagens analisadas houve um aumento significativo desses deslocamentos para as peças moldadas com concretos leves modificados com SB, em relação àquelas com concretos sem SB. Para as peças moldadas com os concretos da dosagem 1, esse aumento de deslocamento foi de 25% para o concreto com P/C de 5% e de 73% para o concreto com P/C de 10%, em comparação à moldada com concreto sem SB. Para as peças moldadas com os concretos da dosagem 5, esse aumento de deslocamento foi de 13% para o concreto com P/C de 5% e de 55% para o concreto com P/C de 10%.

FIGURA 4.39. Diagrama força-deslocamento absoluto no centro das peças moldadas com concretos leves das dosagens 1(a) e 5 (b)

O aumento da força necessária para o aparecimento da primeira fissura e dos deslocamentos no momento do aparecimento da primeira fissura nas peças moldadas com concretos leves modificados com SB pode ser atribuído, principalmente, ao aumento da resistência à tração desse material, em comparação aos concretos leves sem SB.

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 4.39(a) e 4.39(b), observa-se que todas as peças analisadas apresentaram diagramas força-deslocamento com grande linearidade, até o aparecimento da primeira fissura. Observa-se, também, que as peças moldadas com os concretos leves da dosagem 5 apresentaram diagramas com inclinação semelhante. Entretanto, com relação a dosagem 1, observa-se que os diagramas para as peças moldadas com concretos modificados com SB apresentaram menor inclinação do que a observada para a peça com concreto sem SB, indicando, assim, a maior ductilidade das peças moldadas com concretos leves modificados com SB.

Para todas as peças analisadas, o carregamento foi interrompido no momento em que o deslocamento $l/300$ foi atingido, ou seja, nenhuma das peças analisadas apresentou colapso até do deslocamento absoluto de $l/300$ (9 mm) no centro da peça. A Figura 4.40 ilustra uma peça com o deslocamento absoluta no centro de $l/300$.

Todas as peças analisadas apresentaram fissuras com abertura inferior a 0,05 mm e concentradas no terço central da peça, no momento em que atingiram o deslocamento absoluto de $l/300$ no centro da peça.

FIGURA 4.40. Peça com deslocamento absoluto de $l/300$ no terço central

4.3. Estudo microestrutural da matriz de cimento e da interface agregado-matriz

Neste capítulo, pretende-se complementar as informações obtidas na caracterização das propriedades dos concretos leves por meio de uma análise microestrutural do efeito da sílica ativa e do SB na matriz de cimento e na zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento. Pretende-se, também, avaliar o efeito dos agregados leves na zona de transição, por meio de um estudo comparativo, utilizando-se agregados tradicionais.

4.3.1. Porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM)

A análise da porosidade por intrusão de mercúrio foi realizada para as 13 pastas descritas na Tabela 3.6 (Capítulo 3) com 100 dias de idade. As análises foram realizadas pelo Grupo de Estudos de Rochas Ornamentais (GERO), no Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, segundo as recomendações da ASTM D4404-84 (1992) e utilizando-se os equipamentos FILLING APPARATUS e AUTOSCAN50 da marca QUANTACHROME. Os valores da porosidade total e do volume de mercúrio introduzido nas amostras são apresentados na Tabela 4.13.

TABELA 4.13. Valores de porosidade e volume introduzidas das pastas (PIM)

<i>Pasta</i>	<i>Vol. introduzido (ml/g)</i>	<i>Porosidade total (%)</i> *
1 (Ref)	0,1363	24,2
2 (5% SA)	0,1220	22,5
3 (10% SA)	0,1038	18,6
4 (15% SA)	0,1157	20,8
5 (P/C = 2,5%)	0,0958	16,8
6 (P/C = 5%)	0,1168	20,9
7 (P/C = 7,5%)	0,0937	16,3
8 (P/C = 10%)	0,1064	17,8
9 (P/C = 15%)	0,1049	17,8
10 (P/C = 2,5% - 10%SA)	0,0769	13,3
11 (P/C = 5% - 10%SA)	0,1061	18,7
12 (P/C = 7,5% - 10%SA)	0,0911	15,7
13 (P/C = 10% - 10%SA)	0,0985	16,0

* Porosidade calculada para os poros com diâmetro variando entre 0,005 e 10 μm ;

** SA = sílica ativa.

As Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 ilustram a relação entre o volume introduzido acumulado e o diâmetro dos poros e as Figuras 4.44, 4.45 e 4.46 ilustram a distribuição do tamanho dos poros nas amostras analisadas.

FIGURA 4.41. Relação entre o volume acumulado e o diâmetro dos poros obtido por PIM para as pastas 1, 2, 3 e 4.

FIGURA 4.42. Relação entre o volume acumulado e o diâmetro dos poros obtido por PIM para as pastas 1, 5, 6, 7, 8 e 9.

FIGURA 4.43. Relação entre o volume acumulado e o diâmetro dos poros obtido por PIM para as pastas 1, 10, 11, 12 e 13

FIGURA 4.44. Distribuição do tamanho dos poros para as pastas 1, 2, 3 e 4.

FIGURA 4.45. Distribuição do tamanho dos poros para as pastas 1, 5, 6, 7, 8 e 9.

FIGURA 4.46. Distribuição do tamanho dos poros para as pastas 1, 10, 11, 12 e 13.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 4.13, observa-se que dentre as pastas analisadas, a de referência (1) foi a que apresentou maior valor de porosidade total. Nas demais pastas, foi observada uma redução significativa da porosidade total, que não foi necessariamente decrescente com o aumento dos teores de sílica ativa e/ou SB. Para as pastas modificadas com SB, esse efeito de não linearidade de redução da porosidade com o aumento da relação P/C pode ser explicado pelo aumento do teor de ar incorporado nessas pastas. Nas pastas com sílica ativa, esse efeito pode ser explicado pela deficiência da dispersão da adição durante a mistura, decorrente do aumento do

teor de sílica ativa, do tipo de superplastificante utilizado e do método de mistura utilizado.

A influência da sílica ativa e do SB na quantidade e tamanho dos poros das pastas de cimento pode ser melhor entendida, analisando-se as relações entre a distribuição do tamanho dos poros e o volume por eles ocupados, apresentados nas Figuras 4.41 a 4.46. Além da redução da porosidade total, a adição de sílica ativa e/ou de SB provocou a redução do tamanho dos poros, com conseqüente redução da permeabilidade do material.

Nas Figuras 4.41 e 4.44, observa-se que as pastas com adição de sílica ativa apenas, em comparação com a pasta de referência, apresentaram redução da quantidade de poros com diâmetro entre 0,25 e 0,05 μm e aumento da quantidade dos poros com diâmetro entre 0,025 e 0,005 μm . Esse efeito foi crescente com o aumento do teor de sílica ativa na pasta.

Nos resultados obtidos para as pastas modificadas com SB, apresentados nas Figuras 4.42 e 4.45, observa-se que o efeito de redução do tamanho dos poros foi ainda mais acentuado nessas pastas do que o observado nas pastas com sílica ativa e que esse efeito foi crescente com o aumento da relação P/C, com exceção da pasta 9 (P/C = 15%), que apresentou desempenho semelhante à pasta 8 (P/C = 10%). Em comparação à pasta de referência, as pastas modificadas com SB apresentaram uma redução significativa da quantidade de poros com diâmetro abaixo de 0,05 μm . Nas pastas 5, 6 e 7 observou-se um aumento expressivo da quantidade de poros com diâmetro entre 0,012 e 0,05 μm . Nas pastas 8 e 9, que apresentaram comportamento semelhante, houve um aumento da quantidade de poros com diâmetro entre 0,005 e 0,025 μm .

As pastas com sílica ativa e SB foram as que apresentaram maior eficiência na redução do volume e do tamanho dos poros (Figuras 4.43 e 4.46). As quatro pastas com sílica ativa e SB apresentaram, em relação à pasta de referência, redução significativa da quantidade de poros com diâmetro entre 0,025 e 0,25 μm e aumento da quantidade de poros com diâmetro entre 0,005 e 0,025 μm .

A redução da quantidade e do diâmetro dos poros nas pastas com sílica ativa pode ser atribuída aos efeitos de preenchimento (efeito filler) e pozolânico dessa adição mineral na matriz de cimento. Nas pastas modificadas com SB, pode-se explicar esse

FIGURA 4.48. Difratoograma de Raios-X da pasta 2

FIGURA 4.49. Difratoograma de Raios-X da pasta 3

FIGURA 4.50. Difratoograma de Raios-X da pasta 4

FIGURA 4.51. Difratoograma de Raios-X da pasta 5

FIGURA 4.52. Difratoograma de Raios-X da pasta 6

FIGURA 4.53. Difratoograma de Raios-X da pasta 7

FIGURA 4.54. Difratoograma de Raios-X da pasta 8

FIGURA 4.55. Difratoograma de Raios-X da pasta 9

FIGURA 4.56. Difratoograma de Raios-X da pasta 10

FIGURA 4.57. Difratoograma de Raios-X da pasta 11

FIGURA 4.58. Difratoograma de Raios-X da pasta 12

FIGURA 4.59. Difratoograma de Raios-X da pasta 13

Analisando-se os resultados apresentados, observa-se que os picos referentes às substâncias Etringita e Calcita apresentaram baixa intensidade em todos os difratogramas, indicando, assim, a baixa quantidade dessas fases nas pastas analisadas. O gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com característica amorfa, pode ser identificado no difratograma, no halo entre os ângulos 28° e 36° (2θ).

Observa-se, também, que a utilização de sílica ativa e/ou SB provocaram a redução da quantidade de hidróxido de cálcio (CH) nas pastas analisadas, em comparação à pasta de referência, como pode ser observado na Figura 4.60, que apresenta o resumo dos valores da intensidade do pico $2\theta = 18,1^\circ$, característico do CH.

FIGURA 4.60. Valor do pico de CH em $18,1^\circ$ (2θ) para as pastas analisadas

Nas pastas com adição de sílica ativa (Figuras 4.48 a 4.50) observa-se a redução acentuada da quantidade de CH com utilização e com o aumento do teor dessa adição. Segundo MONTEIRO (1993), GJØRV et al. (1990a), BENTUR e COHEN (1987), assim como BENTZ e GARBOCZI (1992), essa redução pode ser atribuída, além do efeito de filler, ao efeito pozolânico da sílica ativa. O efeito de preenchimento (filler) da sílica ativa reduz a quantidade de vazios da matriz de cimento, diminuindo e limitando, assim, a precipitação do hidróxido de cálcio em grandes cristais. A reação pozolânica que, segundo SARKAR et al. (1990), começa aproximadamente no sétimo dia de idade, se desenvolve pela reação entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio, produzindo

silicato de cálcio hidratado, reduzindo, assim, a quantidade de CH livre na matriz de cimento.

Nas pastas modificadas com SB, também foi observada a redução, não tão efetiva como nas pastas com sílica ativa, da quantidade de CH (Figuras 4.51 a 4.55). Pode-se atribuir esse efeito à melhoria da dispersão das partículas de cimento com a utilização de SB, com conseqüente benefício do processo de hidratação. Além desse efeito, segundo RAY et al. (1996), AFRIDI et al. (1989), LARBI e BIJEN (1990), AFRIDI et al. (1990), assim como CHANDRA e FLODIN (1987), a redução da quantidade de hidróxido de cálcio nas pastas modificadas com SB também ocorre pelo efeito do aprisionamento dos íons Ca^{2+} livres, liberados no processo de hidratação do cimento, pelo grupo carboxílico da dispersão polimérica no meio aquoso da pasta no estado ainda fresco. Esse efeito provoca a redução da quantidade dos íons bivalentes de Ca livres para a produção do CH. Segundo esses pesquisadores, a quantificação desse efeito é complexa e pode ser pouco expressiva nas pastas modificadas com SB, mas deve ser considerada nas análises do comportamento do CH na matriz de cimento.

Dentre as pastas analisadas, observou-se que a redução da quantidade de CH foi mais acentuada nas pastas que utilizaram conjuntamente sílica ativa e SB (Figuras 4.56 a 4.59), provavelmente pela associação dos benefícios de cada adição na redução do CH na matriz de cimento, conforme descrito anteriormente.

4.3.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada para análise das 13 pastas de cimento apresentadas na Tabela 3.6 (Capítulo 3) e da interface entre a matriz de cimento e o agregado dos 12 tipos de concretos apresentados na Tabela 3.7 (Capítulo 3). As análises foram realizadas para pastas e concretos com 100 dias de idade. A preparação e análise das amostras foram realizadas no Núcleo de Química (NQ) do Departamento de Materiais de Construção (DMC), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

4.3.3.1. Análise das pastas

Inicialmente, foram determinados os valores das relações Ca/Si , $(\text{Al}+\text{Fe})/\text{Ca}$ e S/Ca para as 13 pastas estudadas, utilizando-se os valores das massas atômicas totais

dos elementos analisados. Essas relações foram determinadas através da análise semiquantitativa de espectrografia por dispersão de energias (EDS) realizada em áreas de 170 x 220 µm das pastas, conforme exemplo apresentado na Figura 4.61. Para tanto, foram realizadas 8 análises de EDS, utilizando-se três amostras polidas, para cada tipo de pasta. Os resultados são apresentados na Tabela 4.15 e Figura 4.62.

FIGURA 4.61. Área analisada por EDS das pastas

TABELA 4.15. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca para as pastas

Pastas	Relações entre massas atômicas totais					
	Ca/Si		(Al+Fe)/Ca		S/Ca	
	Média	DM (%) *	Média	DM (%) *	Média	DM (%) *
1	5,29	2,85	0,09	8,33	0,02	28,85
2	4,26	3,26	0,09	8,11	0,02	28,85
3	3,67	3,58	0,08	13,43	0,02	12,5
4	3,15	3,60	0,08	19,23	0,02	21,43
5	5,06	2,61	0,08	12,70	0,02	21,43
6	4,85	2,76	0,09	10,33	0,02	28,85
7	4,71	7,57	0,09	11,49	0,03	20,00
8	4,82	5,50	0,09	13,24	0,02	5,65
9	4,63	4,65	0,10	8,33	0,01	34,09
10	3,23	3,31	0,09	18,66	0,04	23,48
11	3,39	3,95	0,10	7,89	0,04	12,5
12	3,21	2,43	0,10	5,00	0,04	6,25
13	3,12	2,95	0,10	10,53	0,04	17,86

* Desvio médio.

FIGURA 4.62. Valores da relação Ca/Si para as pastas

Os resultados obtidos possibilitaram a análise da influência da sílica ativa e do SB no comportamento do hidróxido de cálcio (CH), silicato de cálcio hidratado (C-S-H), etringita (AFt) e monossulfatoaluminato de cálcio (AFm) nas pastas de cimento. Além disso, os valores obtidos foram utilizados como referência na determinação da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

Assumindo-se que os elementos Al, Fe e S estão presentes na matriz de cimento, predominantemente nas fases AFt e AFm, os resultados obtidos indicam que os teores dessas fases nas pastas não apresentaram variações significativas com a adição de sílica ativa e de SB. Além disso, comparando os resultados obtidos com os valores sugeridos por KJELSEN et al. (1998) para a identificação da fase AFm, observa-se que em nenhuma das pastas analisadas foi observada a presença excessiva dessa fase.

Analisando-se os resultados obtidos, em comparação aos valores numéricos indicados por KJELSEN et al. (1998), descritos no Capítulo 3 e apresentados a seguir, têm-se a indicação de que todas as pastas analisadas apresentaram baixos teores de CH. Em uma análise comparativa entre as pastas analisadas, observa-se, também, que as pastas com sílica ativa apresentaram uma redução ainda mais significativa do teor de CH, uma vez que os valores da relação Ca/Si foram os mais baixos dentre as pastas estudadas. Segundo MONTEIRO (1993), a baixa relação Ca/Si da matriz de cimento permite que o C-S-H tenha maior capacidade de incorporar íons, tais como álcalis e alumínio, aumentando, assim, a resistência do concreto aos íons agressivos e à reação álcali-agregado.

- **C-S-H:** $0,8 \leq \text{Ca/Si} \leq 2,5$ $(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} \leq 0,2$
- **CH:** $\text{Ca/Si} \geq 10$ $(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} \leq 0,04$ $\text{S/Ca} \leq 0,04$
- **AFm:** $\text{Ca/Si} \geq 4,0$ $(\text{Al} + \text{Fe})/\text{Ca} > 0,4$ $\text{S/Ca} > 0,15$

4.3.3.2. *Análise da zona de transição agregado-matriz*

A determinação da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento para os 12 tipos de concretos (Tabela 4.2), com 100 dias de idade, foi realizada com a representação dos perfis de Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca, utilizando-se a análise semiquantitativa por EDS associado ao MEV, em vários pontos ao longo de uma linha perpendicular à interface agregado-matriz. Optou-se por essa forma de estudo pela possibilidade de se aferir os resultados obtidos com os apresentados por TAYLOR e NEWBURY (1984), WASSERMAN e BENTUR (1996) e KJELSEN et al. (1998), obtendo-se assim valores experimentais para a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

As análises foram realizadas em 15 pontos ao longo de um perfil perpendicular à interface agregado-matriz. Foi utilizada a magnificação da imagem de 500x e a distância entre os pontos de análise próximos à interface foi de aproximadamente 7 μm . Nos pontos mais distantes da interface, a distância utilizada foi em média de 15 μm . O comprimento do perfil analisado, perpendicular à interface, foi de aproximadamente 180 μm : 40 μm no agregado e 140 μm na matriz de cimento. A análise no interior do agregado mostra-se importante para observar a eventual penetração de pasta e para definir, de forma clara, a interface entre o agregado e a matriz de cimento. Foram utilizadas 5 amostras polidas para cada tipo de concreto.

Foram analisados 10 perfis, com 15 pontos cada, para cada tipo de concreto. As Figuras 4.63 a 4.64 apresentam exemplos dos perfis analisados para os concretos com argila expandida e basalto, respectivamente. Especificamente para os concretos leves, com a finalidade de obter informações mais precisas sobre a interface entre o agregado leve e a matriz, foram realizados 5 perfis complementares, com 10 pontos de análise, para cada tipo de concreto leve, com magnificação da imagem de 2000x e distância entre os pontos de 1,8 μm . Um exemplo deste tipo de perfil é apresentado na Figura 4.65.

FIGURA 4.63. Micrografia (MEV-BSE) do perfil com 15 pontos de análise do concreto com argila expandida

FIGURA 4.64. Micrografia (MEV-BSE) do perfil com 15 pontos de análise do concreto com basalto

FIGURA 4.65. Micrografia (MEV-BSE) do perfil com 10 pontos de análise do concreto com argila expandida

As Figuras 4.66 a 4.77 apresentam os resultados da análise semiquantitativa por EDS associado ao MEV, para os 12 tipos de concretos.

FIGURA 4.66. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 1A.
(Argila expandida – Referência)

FIGURA 4.67. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 1B.
(Basalto – Referência)

FIGURA 4.68. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 3A.
(Argila expandida – 10% SA)

FIGURA 4.69. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 3B.
(Basalto – 10% SA)

FIGURA 4.70. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 6A.
(Argila expandida – P/C = 5%)

FIGURA 4.71. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 6B.
(Basalto – P/C = 5%)

FIGURA 4.72. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 8A.
(Argila expandida – P/C = 10%)

FIGURA 4.73. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 8B.
(Basalto – P/C = 10%)

FIGURA 4.74. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 11A.
(Argila expandida – P/C = 5% e 10% SA)

FIGURA 4.75. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 11B.
(Basalto – P/C = 5% e 10% SA)

FIGURA 4.76. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 13A.
(Argila expandida – P/C = 10% e 10% SA)

FIGURA 4.77. Relações Ca/Si, (Al+Fe)/Ca e S/Ca do concreto 13B.
(Basalto – P/C = 10% e 10% SA)

Analisando-se os resultados, observa-se que os valores das relações (Al+Fe)/Ca e S/Ca apresentaram comportamento constante ao longo de toda a extensão analisada da

matriz de cimento, inclusive na região próxima ao agregado (zona de transição), demonstrando, assim, que, nos concretos estudados, não houve uma região preferencial para a formação de AFm e AFt. Os valores obtidos para as relações $(Al+Fe)/Ca$ e S/Ca indicam que nenhum dos concretos estudados apresentaram altos teores de AFm e AFt, assumindo que os elementos Al, Fe e S estão presentes na matriz de cimento, predominantemente nas fases AFt e AFm.

Como o comportamento dos valores das relações $(Al+Fe)/Ca$ e S/Ca foi praticamente constante ao longo de toda a extensão analisada da matriz de cimento, a espessura da zona de transição foi determinada por meio da análise do comportamento da relação Ca/Si , que apresentou variação significativa na região próxima ao agregado, possibilitando, assim, a identificação da zona de transição. A espessura da zona de transição, foi definida como a distância entre a interface agregado-matriz e o ponto em que os valores da relação Ca/Si se estabilizaram e se igualaram aos obtidos na análise das pastas de cimento (Tabela 4.15). Os valores das espessuras da zona de transição, para os concretos analisados, são apresentados na Figura 4.78.

FIGURA 4.78. Espessura da zona de transição dos concretos analisados

A espessura da zona de transição obtida para o concreto de referência com basalto, aproximadamente 55 μm , está muito próximo dos valores mencionados por BENTUR e COHEN (1987), SCRIVENER et al. (1988), MONTEIRO e METHA

(1986, 1988), assim como por MONTEIRO (1993), para concretos sem adições ou aditivos. Apesar dos valores mais usuais para a espessura da zona de transição estar entre 40 e 60 μm , nos concreto sem adições ou aditivos, esses valores podem variar significativamente, em função do tipo de cimento e da relação água/aglomerante utilizados, como por exemplo, nos estudos realizados por VIEIRA (2000) e PAULON (1991), no qual foram observados valores de 25 e 100 μm , respectivamente.

Os resultados apresentados, demonstram que a utilização de sílica ativa ou de SB provoca a redução significativa da espessura da zona de transição, em todos os tipos de concretos estudados. Observa-se, também, que nesses tipos de concretos houve uma diminuição do teor de CH na zona de transição, em comparação ao concreto de referência, que pode ser constatada pela redução dos valores da relação Ca/Si nessa região.

Nos concretos que utilizaram conjuntamente sílica ativa e SB, foram observados os menores valores da espessura da zona de transição e os menores teores de CH nessa região, analisando-se comparativamente os valores da relação Ca/Si.

Observa-se, ainda, que os valores da espessura da zona de transição nos concretos com agregados leves foram expressivamente inferiores aos valores obtidos nos concretos com basalto. Esse efeito está relacionado, principalmente, com a maior absorção de água dos agregados leves, em comparação ao basalto, reduzindo, assim, a quantidade de água na superfície desse tipo de agregado, com conseqüente redução de espessura da zona de transição.

Conforme mencionado no Capítulo 1, diversos pesquisadores afirmam que há uma forte relação entre a espessura e qualidade da zona de transição agregado-matriz e as propriedades mecânicas e a durabilidade dos concretos. A zona de transição influencia diretamente as propriedades relacionadas à resistência mecânica, o módulo de deformação, o comportamento do diagrama tensão-deformação, o mecanismo de propagação de fissuras e a permeabilidade dos concretos.

Dessa forma, as alterações de desempenho de algumas propriedades dos concretos decorrentes da utilização de sílica ativa, SB, assim como de agregados leves, estão relacionadas também com a redução da espessura da zona de transição agregado-matriz. Como exemplos destas alterações de desempenho, pode-se mencionar o

aumento da resistência à tração, redução da permeabilidade e maior linearidade do diagrama tensão-deformação.

4.3.3.3. Mapas de Raios-X

Foram realizados mapas de visualização qualitativa, denominados, neste trabalho, mapas de Raios-X, dos elementos químicos presentes na região da interface agregado-matriz para os 12 tipos de concretos apresentados na Tabela 3.7 (Capítulo 3). Para cada tipo de concreto, foram realizados dois tipos de mapas, um com três elementos (Si, Ca e S) e outro com dez elementos químicos (Si, Ca, S, K, Mg, Na, Al, O, Ti e C). As Figuras 4.79 e 4.80 ilustram os dois tipos de mapas analisados. Foram realizadas 3 análises para cada tipo de mapa e de concreto.

FIGURA 4.79. Mapas de Raios-X com três elementos (concreto leve de referência)

FIGURA 4.80. Mapas de Raios-X com dez elementos (concreto leve de referência)

Essas análises foram realizadas com o intenção de complementar as informações obtidas nos estudos da zona de transição agregado-matriz utilizando MEV associado ao EDS, por meio da avaliação da variação da quantidade de alguns elementos químicos na zona de transição. Todavia, nessas análises, não foi possível verificar a alteração da quantidade de Ca e Si na região da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento. Para todos os tipos de concretos analisados, as imagens referentes aos elementos Si e Ca apresentaram intensidade cromática constante na matriz de cimento.

Entretanto as análises possibilitaram observar que todos os concretos estudados não apresentaram formação de Etringita na interface agregado-matriz, nem na matriz de cimento, devido à baixa intensidade cromática das imagens do S (enxofre) realizadas em todos os concretos.

Os demais elementos químicos analisados apresentaram imagens com intensidade cromática constante e semelhante entre os concretos estudados, impossibilitando, assim, qualquer análise comparativa.

4.3.4. Microscopia ótica de transmissão (MOT)

A técnica de microscopia ótica de transmissão foi utilizada para a análise da zona de transição agregado-matriz dos 12 tipos de concretos descritos na Tabela 3.7 (Capítulo 3), com 160 dias de idade. Foi utilizado um microscópio ótico da Marca Olympus, modelo BX60, associado a um sistema informatizado de análise de imagens, alocado no Núcleo de Química (NQ) do Departamento de Materiais de Construção (DMC), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

A análise dos concretos com a MOT foi realizada com a intenção de complementar os estudos da zona de transição utilizando MEV associado ao EDS, por meio da análise do comportamento dos grãos anidros de cimento nas proximidades do agregado.

Os grãos anidros de cimento, como o C_2S (belite) e C_3S (alite), podem ser facilmente identificados nas imagens obtidas no microscópio ótico de transmissão (MOT), com mostrado na Figura 4.81, no qual se apresenta uma imagem realizada com luz transmitida utilizando-se analisador com polares paralelos (LTPP).

FIGURA 4.81. Micrografia (MOT) da pasta de cimento (400x)

Foram realizadas dez análises para cada tipo de concreto, para a verificação do comportamento dos grãos anidros de cimento nas proximidades dos agregados, obtendo-se, assim, informações qualitativas sobre a zona de transição agregado-matriz. As imagens foram produzidas no modo de luz transmitida com polares paralelos (LTPP) com magnificação de

200x. As Figuras 4.82 a 4.87 apresentam algumas análises, sendo uma imagem para cada tipo de concreto, em caráter ilustrativo.

argila expandida

basalto

FIGURA 4.82. Características da zona de transição dos concretos de referência (1)

argila expandida

basalto

FIGURA 4.83. Características da zona de transição dos concretos com 10% de sílica ativa (3)

argila expandida

basalto

FIGURA 4.84. Características da zona de transição dos concretos com P/C de 5% (6)

argila expandida

basalto

FIGURA 4.85. Características da zona de transição dos concretos com P/C de 10% (8)

argila expandida

basalto

FIGURA 4.86. Características da zona de transição dos concretos com P/C de 5% e 10% de sílica ativa (11)

argila expandida

basalto

FIGURA 4.87. Características da zona de transição dos concretos com P/C de 5% e 10% de sílica ativa (13)

Nos resultados obtidos para os concretos de referência (1), observa-se que a espessura da zona de transição, caracterizada pela região com baixa quantidade de grãos anidros de

cimento próximo ao agregado, apresentam valores próximos aos obtidos no estudo de MEV associado ao EDS, ou seja, aproximadamente 55 μm para os concretos com basalto e 30 μm para os concretos com argila expandida.

Para os concretos com sílica ativa (3) ou SB (6 e 8), observa-se uma acentuada redução da zona de transição, em relação aos valores obtidos para os concretos de referência, conforme observado nas análises de MEV associado ao EDS.

Nos concretos com adição de sílica ativa e SB (11 e 13) foram observados os menores valores da espessura da zona de transição.

Nas imagens das lâminas delgadas dos concretos leves, pôde-se observar, também, as características da superfície dos agregados leves, que apresentam uma camada (casca) de baixa porosidade e espessura aproximada de 50 μm (Figura 4.88).

FIGURA 4.88. Micrografias (MOT – luz transmitida) dos agregados leves

5. CONCLUSÕES

Esta tese apresenta um estudo sobre um tipo particular de concreto, com características e propriedades diferenciadas em função da utilização conjunta de cimento de alta resistência inicial, sílica ativa, látex de estireno butadieno (SB), superplastificante acelerador e agregados leves. Este concreto, denominado concreto leve de alto desempenho (CLAD) modificado com SB, encontra aplicação específica no setor da construção civil, na produção de elementos pré-fabricados esbeltos, tais como painéis estruturais e de vedação, telhas e vigas.

De acordo com os objetivos inicialmente estipulados, o programa experimental utilizado mostrou-se adequado para a análise das características e propriedades dos concretos leves de alto desempenho modificados com SB.

Com o conjunto de informações obtidas no programa experimental, observou-se que os concretos leves de alto desempenho modificados com SB são extremamente adequados à produção de elementos pré-fabricados esbeltos, devido essencialmente à redução da massa específica e ao excelente desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade. Nos estudos microestruturais, verificou-se que a utilização de sílica ativa e de SB promoveram a diminuição da quantidade e do diâmetro dos poros capilares e da quantidade de hidróxido de cálcio (CH) na matriz de cimento, assim como reduziram a espessura da zona de transição agregado-matriz. Observou-se, também, que os concretos com agregados leves nacionais apresentaram valores da espessura da zona de transição agregado-matriz significativamente inferiores aos observados para os concretos com agregados tradicionais.

A seguir, apresenta-se uma análise mais específica dos resultados obtidos nos estudos dos processos de dosagem e produção dos concretos leves, na caracterização

das propriedades dos concretos leves, na análise do comportamento das peças esbeltas submetidas à flexão, assim como nos estudos microestruturais da matriz de cimento e da interface agregado-matriz.

5.1. Dosagem e produção dos concretos leves

No estudo da interação entre os materiais constituintes dos concretos leves, não se observou nenhum tipo de incompatibilidade físico-química do uso conjunto de cimento de alta resistência inicial, sílica ativa, látex de estireno butadieno (SB) e superplastificante acelerador. Verificou-se, ainda, o aumento expressivo dos tempos de início e fim de pega das pastas modificadas com SB, em relação às sem SB.

O processo de dosagem utilizado foi adequado e possibilitou a obtenção de concretos leves com as características estabelecidas inicialmente, sendo elas: resistência à compressão aos 7 dias acima de 35 MPa; fator de eficiência aos 7 dias acima de 25 MPa.dm³/kg; e índice de consistência (NBR 7215) no intervalo de 200 ± 10 mm.

Os processos de adensamento utilizados para os concretos leves foram eficientes e não se observou o fenômeno de segregação dos agregados.

No estudo para determinação do procedimento adequado de cura dos concretos leves, observou-se que a utilização de SB possibilitou a redução do tempo de cura úmida nas primeiras idades.

5.2. Caracterização das propriedades dos concretos leves

Os concretos leves, para todas as dosagens estudadas, apresentaram coesão e consistência adequadas para o manuseio e a moldagem, além da manutenção da trabalhabilidade por, pelo menos, uma hora após a mistura.

Não foram observados os fenômenos de segregação dos agregados e exsudação nos concretos leves no estado fresco.

A utilização de SB ocasionou a redução significativa da relação água/aglomerante dos concretos leves, sem alteração do índice de consistência.

Os concretos leves apresentaram valores da massa específica no estado seco, em média, 35% abaixo dos normalmente verificados nos concretos com agregados tradicionais.

Os concretos leves apresentaram valores de resistência à compressão às 12 horas de idade acima de 15 MPa, valor usualmente considerado adequado à desmoldagem e ao transporte de peças pré-fabricadas.

Observou-se que os concretos leves, para as quinze dosagens analisadas, apresentaram, aos 7 dias de idade, valores de resistência à compressão superiores à 35 MPa e fator de eficiência acima de 25 MPa.dm³/Kg.

Os valores de resistência à tração dos concretos leves sem SB foram satisfatórios, considerando-se os valores normalmente obtidos para concretos leves com as mesmas características de dosagem. Entretanto os valores de resistência à tração, tanto na compressão diametral quanto na flexão, dos concretos leves modificados com SB foram significativamente superiores aos obtidos para os concretos leves sem SB.

Os valores do módulo de deformação dos concretos leves foram significativamente inferiores aos obtidos para os concretos tradicionais, com características semelhantes de dosagem. A utilização de SB não ocasionou a redução significativa dos valores do módulo de deformação dos concretos leves, como normalmente ocorre nos concretos tradicionais.

Os diagramas tensão-deformação obtidos para os concretos leves apresentaram grande linearidade no trecho ascendente da curva e valores de deformação maiores do que as observadas nos concretos tradicionais, para o mesmo nível de tensão.

Nos diagramas tensão-deformação com deformação controlada dos concretos leves, observou-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram o trecho descendente do diagrama com menor inclinação do que o observado para os concretos leves sem SB, indicando, assim, a maior tenacidade dos concretos leves modificados com SB.

Com relação à permeabilidade dos concretos leves, observou-se nos resultados das análises de absorção de água por imersão e por capilaridade, que todas as dosagens analisadas apresentaram desempenho satisfatório e que os concretos leves modificados com SB apresentaram permeabilidade à água significativamente inferior à observada nos concretos leves sem SB.

Na análise experimental de resistência à penetração de cloretos, observou-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram proteção da armadura aos íons cloretos significativamente superior à observada nos concretos leves sem SB.

Verificou-se que os concretos leves modificados com SB apresentaram resistência aos ácidos sulfúrico, clorídrico e acético significativamente superior ao observada para os concretos leves sem SB.

Com relação às análises de resistência ao impacto e à abrasão por jateamento de areia, observou-se que todos os concretos leves em estudo apresentaram desempenho inferior ao observado nos concretos com agregados tradicionais. Entretanto a utilização do SB melhorou sensivelmente o desempenho dessas propriedades.

Os valores de retração por secagem dos concretos leves em estudo foram superiores aos normalmente observados para os concretos com agregados tradicionais, para as mesmas condições de dosagem. Entretanto estão em conformidade com os limites máximos e mínimos recomendados em estudos nacionais e internacionais para os concretos com agregados leves. Além disso, observou-se que a utilização de SB reduziu o valor da retração por secagem final dos concretos leves.

5.3. Análise de elementos construtivos esbeltos submetidos à flexão

A metodologia utilizada para o estudo comparativo de ductilidade e tenacidade entre as peças esbeltas produzidas com concretos leves modificados com SB e com concretos leves sem SB foi extremamente adequada.

Observou-se que as peças esbeltas produzidas com concretos leves modificados com SB apresentaram maior ductilidade e tenacidade em comparação às as peças produzidas com concretos leves sem SB.

Os valores das forças necessárias para o surgimento da primeira fissura e para atingir o deslocamento de $l/300$ no meio do vão da peça foram significativamente superiores nas peças produzidas com concretos leves modificados com SB, em relação às produzidas com concretos sem SB.

Todas as peças analisadas apresentaram valores de abertura de fissuras inferiores a 0,05 mm até o final da análise experimental, determinado pelo deslocamento absoluto de $l/300$ no meio do vão.

5.4. Estudos microestruturais

Com os resultados da análise da porosidade das pastas por PIM, observou-se que a sílica ativa e o SB reduziram a porosidade total das pastas de cimento e o diâmetro dos poros capilares. Os melhores resultados relacionados à redução da porosidade total e à distribuição do diâmetro dos poros foram obtidos para as pastas que utilizaram conjuntamente sílica ativa e SB.

Nas análises de difratometria de Raios-X das pastas estudadas, observou-se que a utilização de sílica ativa ou SB ocasionou a redução da quantidade de hidróxido de cálcio na

matriz de cimento, sendo a sílica ativa mais eficiente nesta redução do que o SB, para os teores de sílica ativa e SB utilizados. Dentre as pastas analisadas, observou-se que a redução da quantidade de hidróxido de cálcio foi mais acentuada nas pastas que utilizaram conjuntamente sílica ativa e SB. Observou-se, também, a baixa quantidade das fases Etringita e Calcita, em todas as pastas analisadas.

Nos resultados das análises da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento, utilizando-se as técnicas de MEV associado ao EDS e MOT, observou-se que a utilização de sílica ativa ou de SB ocasionou a redução significativa da espessura da zona de transição agregado-matriz dos concretos, em comparação ao concreto de referência.

Nos concretos que utilizaram conjuntamente sílica ativa e SB, foram observados os menores valores da espessura da zona de transição agregado-matriz e os menores teores de CH nessa região.

Observou-se que os valores da espessura da zona de transição agregado-matriz nos concretos com agregados leves foram expressivamente inferiores, cerca de 50%, aos obtidos nos concretos com basalto.

5.5. Propostas de desenvolvimentos futuros

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, uma série de aspectos correlatos, referentes ao desenvolvimento da tecnologia dos concretos leves, mostraram-se merecedores de aprofundamento científico futuro. Com isso, a seguir, apresentam-se algumas propostas de desenvolvimentos futuros:

- utilização de fibras nos concretos leves modificados com SB;
- análise de concretos leves com agregados com maiores dimensões e menores valores de consumo de cimento;
- utilização de agregados leves reciclados, como o pneu;
- análise do comportamento de outras tipologias de peças pré-fabricadas esbeltas;
- estudo da fluência, da difusão de íons cloreto e da permeabilidade ao oxigênio dos concretos leves;
- adequação dos métodos atuais de ensaio e desenvolvimento de novos métodos para a caracterização dos agregados leves e dos concretos com agregados leves;
- aspectos referentes ao cálculo estrutural, especificamente a verificação dos estados limites último e de utilização;

- análise da influência da redução da espessura da zona de transição agregado-matriz nas propriedades dos concretos leves;
- atuação física e química do SB no processo de hidratação do cimento.

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A.1. CIMENTO PORTLAND

Na produção dos concretos leves, empregou-se o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI PLUS), fabricado pela empresa CIMINAS S.A. (grupo Holdercim). As Tabelas A.1 e A.2 apresentam as características e propriedades e a análise química desse cimento, respectivamente.

TABELA A.1. Características e propriedades do CPV ARI

<i>Características e Propriedades</i>		<i>Unidade</i>	<i>CPV ARI</i>
Massa Específica (NBR 6474) *		kg/dm ³	3,12
Massa Unitária no Estado Solto (NBR 7251) *		kg/dm ³	1,02
Finura	Resíduo # 200 (NBR 11579)	%	0,2
	Resíduo # 325	%	3,4
	Sup. Esp. Blaine (NBR 7224)	cm ² /g	4687
Tempo de Pega *	Início (NBR 11581)	min	130
	Fim (NBR 11581)	min	210
Expansibilidade a quente (NBR 11582)		mm	0,4
Resistência à Compressão (f_{cj}) (NBR 7215)	1 dia	MPa	27,7
	3 dias	MPa	42,0
	7 dias	MPa	46,7
	28 dias	MPa	56,1

Fonte: Fabricante.

* Valores experimentais obtidos no LCC (EESC-USP).

TABELA A.2. Análise química do CPV ARI

<i>Compostos</i>	<i>%</i>
C ₃ S	58,60
C ₂ S	10,31
C ₃ A	7,71
C ₄ AF	9,32

Fonte: Fabricante.

A.2. Sílica Ativa (SA)

Utilizou-se sílica amorfa, designada, neste trabalho, de sílica ativa (SA), fornecida pela empresa MICROSSÍLICA Tecnologia Indústria e Comércio Ltda., com massa específica (NBR 6474) igual a 2,21 kg/dm³, massa unitária (adaptação da NBR 12127) igual a 0,20 kg/dm³ e superfície específica (NBR 7224), aproximadamente, igual a 18.000 cm²/g. A Tabela A.3 e a Figura A.1 apresentam a composição química e a distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada, respectivamente.

TABELA A.3. Análise química da sílica ativa

<i>Composto</i>	<i>%</i>
PF	3,14
SiO ₂	94,3
Al ₂ O ₃	0,09
Fe ₂ O ₃	0,10
CaO	0,30
MgO	0,43
SO ₃	-
K ₂ O	0,83
Na ₂ O	0,27

Fonte: Fabricante

A.3. Argila Expandida

Como agregado leve, utilizou-se a argila expandida nacional, fabricada pela empresa CINEXPAN S.A., em duas graduações: Cinexpan 0500 ($D_{\text{máx}} = 4,8$ mm) e Cinexpan 1506 ($D_{\text{máx}} = 9,5$ mm). Esse agregado leve, produzido pelo processo de nodulação (forno rotativo) a temperaturas médias de 1100°C, apresenta formato

arredondado regular (Figura A.2) com uma camada externa de baixa porosidade (Figura A.3).

FIGURA A.1. Distribuição granulométrica da sílica ativa (Fonte: Fabricante)

Cinexpan 0500

Cinexpan 1506

FIGURA A.2. Aspecto dos agregados leves

(a)

(b)

FIGURA A.3. Aspecto da estrutura interna dos agregados leves:
(a) Microscopia eletrônica de varredura, modo elétrons secundários (300x) e
(b) Microscopia ótica de transmissão (200x)

A Figura A.4 apresenta o difratograma de Raios-X do agregado leve com a identificação dos compostos representativos. A Tabela A.4 apresenta o resultado da análise química do agregado leve.

FIGURA A.4. Difratograma de Raios-X do agregado leve

TABELA A.4. Análise química do agregado leve

Composto	%
PF	6,8
SiO ₂	52,9
Al ₂ O ₃	18,9
Fe ₂ O ₃	11,1
CaO	0,09
MgO	3,44
TiO ₂	0,88
K ₂ O	5,5
Na ₂ O	0,22

Fonte: Fabricante

Adotou-se, no estudo de dosagem dos concretos leves, o proporcionamento de 50% de Cinexpan 0500 e 50% de Cinexpan 1506, em massa, para composição do

agregado leve final. Com isso, analisaram-se, também, algumas características e propriedades para esse proporcionamento entre os agregados leves.

A Tabela A.5 apresenta os valores da massa específica e da massa unitária dos dois tipos de argila expandida. A Tabela A.6 e a Figura A.5 apresentam a composição granulométrica dos agregados leves. Analisando a Tabela A.5, verifica-se que os agregados leves apresentam valores da massa unitária, no estado seco e solto, abaixo dos valores máximos recomendados pela NM 35/95, de 1,12 e 1,04 kg/dm³ para agregados com dimensão máxima de 4,8 e 9,5 mm, respectivamente.

TABELA A.5. Características dos agregados leves

<i>Propriedades</i>	<i>Cinexpan 0500</i>	<i>Cinexpan 1506</i>
Massa Específica (kg/dm ³)	1,51 (NBR 9776)	1,11 (NBR 9937)
Massa unitária no estado seco e solto (kg/dm ³) (NBR 7251)	0,86	0,59

TABELA A.6. Composição granulométrica dos agregados leves (NBR 7217)

<i>Abertura da peneira (mm)</i>	<i>Cinexpan 0500</i>		<i>Cinexpan 1506</i>		<i>Cinexpan 0500 e 1506 ⁽³⁾</i>	
	<i>% Retida Acum.</i>	<i>Limites NM 35 ⁽¹⁾ (%)</i>	<i>% Retida Acum.</i>	<i>Limites NM 35 ⁽²⁾ (%)</i>	<i>% Retida Acum.</i>	<i>Limites NM 35 ⁽²⁾ (%)</i>
12,5	0	-	0	-	0	-
9,5	0	-	2	0-10	1	0-10
6,3	0	-	28	-	11	-
4,8	0	0-15	59	10-35	26	10-35
2,4	14	-	93	35-65	53	35-65
1,2	39	20-60	98	-	70	-
0,6	69	-	99	-	86	-
0,3	92	65-90	100	75-90	97	75-90
0,15	98	78-95	100	85-95	99	85-95
Resíduo	100	-	100	-	100	-
Dim. máx. caract. (NBR 7211)	4,8 mm		9,5 mm		9,5 mm	
Módulo de Finura (NBR 7211)	3,12		5,51		4,32	

⁽¹⁾ Limites de composição granulométrica para agregado leve com graduação entre 0 e 4,8 mm (NM35).

⁽²⁾ Limites de composição granulométrica para agregado leve com graduação entre 0 e 9,5 mm (NM35).

⁽³⁾ Composição em massa: 50% Cinexpan 0500 e 50 % Cinexpan 1506.

FIGURA A.5. Curvas granulométricas dos agregados leves

Não foi possível determinar a massa específica do agregado leve Cinexpan 0500 pelo método da NBR 9937. Assim, para esse tipo de agregado leve determinou-se a massa específica pelo método descrito na NBR 9776 (frasco de Chapman).

A argila expandida utilizada se enquadra nas recomendações da NM 35/95 quanto aos limites máximos de impurezas orgânicas, torrões de argila, perda ao fogo e manchamento.

A absorção de água dos agregados leves foi determinada conforme método proposto por TEZUKO (1973), colocando-se 200g de agregado leve dentro de um frasco de Erlenmeyer de 500ml, adaptado com uma bureta de 50 ml e protetor de gargalo, para garantir a imersão das partículas mais leves. Foram anotadas as variações de nível de água e os tempos correspondentes durante as primeiras 24 horas após a imersão dos agregados

O ensaio de absorção de água foi realizado para os agregados leves em duas condições de umidade: 1) agregado seco em estufa à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até constância de massa, aproximadamente após 24 horas; e 2) agregado nas condições de recebimento e estocagem do Laboratório de Construção Civil – EESC/USP (temperatura de $25 \pm 5^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar $65 \pm 15\%$). Os resultados são apresentados na Tabela A.7.

Na produção dos concretos utilizaram-se agregados leves nas condições de armazenagem do Laboratório de Construção Civil - EESC/USP ($25 \pm 5^\circ\text{C}$ e UR = $65 \pm 15\%$). Nessas condições, os agregados leves apresentaram teor de umidade abaixo de 1%, em massa.

TABELA A.7. Absorção de água dos agregados leves

	<i>Absorção de Água (%) (em massa)</i>					
	<i>Cinexpan 0500</i>		<i>Cinexpan 1506</i>		<i>Cinexpan 0500 e 1506</i> ₍₁₎	
	<i>CEL⁽²⁾</i>	<i>Seco</i>	<i>CEL⁽²⁾</i>	<i>Seco</i>	<i>CEL⁽²⁾</i>	<i>Seco</i>
1 min	0,33	0,50	0,50	0,67	0,33	0,50
5	0,73	1,00	1,33	1,50	1,00	1,10
10	1,00	1,30	1,67	2,00	1,20	1,43
30	1,83	2,20	2,67	3,10	2,20	2,50
1 hora	2,67	3,00	3,50	3,83	3,10	3,20
2	3,50	3,70	4,17	4,33	3,80	4,00
6	4,67	4,83	5,33	5,50	4,83	5,17
1 dia	6,00	6,83	7,00	7,50	6,33	7,17

⁽¹⁾ 50% de Cinexpan 0500 e 50% de Cinexpan 1506, em massa;

⁽²⁾ Condições de estocagem do laboratório ($25 \pm 5^\circ$ e UR = $65 \pm 15\%$).

A.4. Areia natural quartzosa

Empregou-se a areia natural quartzosa proveniente do Rio Mogi-Guaçu, município de São Carlos, estado de São Paulo. A Tabela A.8 e a Figura A.6 apresentam a composição granulométrica da areia. A areia utilizada atendeu aos requisitos da NBR 7211 quanto à presença de substâncias nocivas aos concretos e apresentou massa específica (NBR 9776) igual a $2,63 \text{ kg/dm}^3$ e massa unitária no estado solto e seco (NBR 7251) igual a $1,49 \text{ kg/dm}^3$.

TABELA A.8. Granulometria da areia natural (NBR 7217)

<i>Peneira # (mm)</i>	<i>% Retida Acumulada</i>
4.8	0.0
2.4	2.0
1.2	9.0
0.6	28.0
0.3	62.0
0.15	97.0
Resíduo	100.0
Dimensão máxima característica: $D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}$ (NBR 7211)	
Módulo de finura: MF = 2,00 (NBR 7211)	
Classificação NBR 7211: areia fina (zona 2)

FIGURA A.6. Curva granulométrica da areia natural quartzosa

A.5. Aditivo Superplastificante (SPA)

O aditivo superplastificante utilizado foi do tipo acelerador com elevado efeito redutor de água, classificado como SPA segundo a NBR 11768, fabricado pela empresa MBT Brasil Indústria e Comércio. A Tabela A.9 apresenta as características do aditivo superplastificante.

TABELA A.9. Características do aditivo superplastificante

<i>Propriedades e características</i>	<i>Unidade</i>	<i>Resultado</i>
Massa específica	kg/dm ³	1,11
pH	-	8,89
Teor de sólidos	%	16,49
Aspecto	-	Liq. homogêneo
Cor	-	Amarelo
Base química	-	Melamina sulfonato formaldeídico

Fonte: Fabricante

A.6. Látex de estireno butadieno (SB)

Utilizou-se uma dispersão aquosa (látex), formulada a partir do copolímero de estireno butadieno, fabricada pela empresa RHODIA Brasil Ltda., denominado

comercialmente Rhoximat SB-112. A Tabela A.10 apresenta as propriedades e características do látex de estireno butadieno.

Para o controle da incorporação de ar provocada pelo látex de estireno butadieno (SB) em argamassas e concretos, normalmente excessiva, o fabricante utiliza um agente anti-espumante, fabricado pela mesma empresa e denominado comercialmente Rhodorsil 414, à base de silicone. O teor de anti-espumante adicionado varia normalmente entre 0,15 e 0,25%, em relação à massa de látex, e é determinado pelo controle da massa específica de uma argamassa padrão (traço 1:3), com adição de 10% de látex em relação a massa de cimento, que deve variar entre 2,1 e 2,2 kg/dm³.

TABELA A.10. Propriedades e características do látex de estireno butadieno (SB)

<i>Propriedades e Características</i>	<i>Unidade</i>	<i>Resultado</i>
Teor de sólidos	%	50,0
Massa específica	kg/dm ³	1,02
PH	-	7,9
Estabilizante	-	Aniônico
Agente anti-espumante	-	Silicone
Tensão superficial	mN/m	35,0
Tamanho médio das partículas	µm	0,16
Aspecto	-	Liq. branco leitoso
T.M.F.F.	°C	< 0
Viscosidade Broohfield (RVT / 50 rpm / 23°C)	MPa.s	91,0

Fonte: Fabricante.

ANEXO B

ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS

B.1. Introdução

A associação de sílica ativa, superplastificante e SB na produção dos concretos leves tem, como princípio básico, melhorar o desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade desses concretos. Entretanto essa associação deve ser previamente estudada com o objetivo de detectar uma possível incompatibilidade entre esses materiais e avaliar o poder redutor de água do superplastificante e do SB (PRUDÊNCIO JÚNIOR et al., 1994; ALVES e HELENE, 1996; CASSA et al., 1999)

Assim, os objetivos deste estudo são avaliar o poder redutor de água do superplastificante e do SB e analisar a interação desses materiais com o cimento Portland e a sílica ativa, com a finalidade de detectar uma possível incompatibilidade físico-química. Para tanto, foram analisados os tempos de pega e a consistência das pastas de cimento Portland com sílica ativa, superplastificante e SB. A consistência das pastas de cimento foi avaliada utilizando-se o método do “mini-slump” proposto por KANTRO (1980).

B.2. Procedimento experimental

B.2.1. Tempo de pega

Foram analisados os tempos de início e fim de pega das pastas de cimento Portland com sílica ativa, superplastificante e SB, de acordo com as prescrições da NBR 11580 e NBR 11581.

B.2.2. Método do “mini-slump” (KANTRO, 1980)

Dentre as formas de quantificar o efeito redutor de água de um aditivo, o método proposto por KANTRO (1980) apresenta a vantagem de medir apenas o efeito do aditivo sobre o cimento, sem a interferência dos agregados, e consiste na comparação da área de espalhamento de pastas de cimento em ensaios de mini-slump, muito similar ao slump-test, utilizando um molde de tronco de cone com corpo cilíndrico de material translúcido cujas dimensões internas são: altura 57 mm ($2\frac{1}{4}$ "); diâmetro inferior 38 mm ($1\frac{1}{2}$ "); e diâmetro superior 19 mm ($\frac{3}{4}$ ") (Figura B.1).

FIGURA B.1. Molde de tronco de cone para ensaio de mini-slump (KANTRO, 1980)

O procedimento deste ensaio consiste em preencher, com a pasta de cimento, o tronco de cone assentado sobre uma placa de vidro plano liso, nivelado horizontalmente, e, em seguida, levantá-lo, permitindo que a pasta se deforme desimpedida até seu equilíbrio em estado de repouso. Com a utilização de um planímetro ou outro procedimento equivalente, determina-se a área que a projeção vertical da pasta deformada abrange sobre a placa de vidro. As áreas medidas pela projeção da pasta deformada após a retirada do molde variam entre 12 cm^2 (área da base do molde) e, aproximadamente, 200 cm^2 (BUCHER, 1988; KANTRO, 1980).

Esse método utiliza a área do espalhamento correspondente à relação água/cimento de 0,36 como referência do efeito reológico de uma pasta de cimento Portland. Segundo KANTRO (1980), as áreas de espalhamento das pastas com relação água/cimento entre 0,36 e 0,60 são proporcionais de maneira direta e linear.

Inicialmente, traça-se a curva do comportamento reológico, ou de sensibilidade à água, do cimento. Os eixos do gráfico são área de espalhamento e relação água/cimento. A curva é traçada para as relações água/cimento 0,36 (referência), 0,40, 0,45, 0,514 e 0,60, caracterizando os valores de redução de água de 0, 10, 20, 30 e 40%, respectivamente. Assim, a inclinação de cada reta representa a intensidade com que um cimento reage reologicamente à variação da quantidade de água de amassamento. Caso os valores das relações água/cimento utilizados não sejam iguais aos valores anteriormente mencionados, pode-se calcular a redução de água correspondente com a equação B.1.

$$A_i = 100 \times ((a/c)_i - 0,36) / (a/c)_i \quad (\text{B.1}) \text{ (BUCHER, 1988)}$$

onde: A_i = redução do teor de água de amassamento (%);

$(a/c)_i$ = relação água/cimento.

As curvas de comportamento reológico do cimento podem ser ajustadas para uma reta da forma:

$$y = b + m.x \quad (\text{B.2}) \text{ (BUCHER, 1988)}$$

onde: y = área de espalhamento, em cm^2 ;

x = relação água/cimento, em massa;

b, m = constantes.

Em seguida, preparam-se as pastas com relação água/cimento constante de 0,36 com a adição de teores crescentes do aditivo analisado. Com a área de espalhamento obtida para cada concentração do aditivo, pode-se calcular o teor de redução da água equivalente que este aditivo provoca, utilizando-se a equação B.3:

$$A_c = 100 \times (S_c - b - (a/c)_o \cdot m) / (S_c - b) \quad (\text{B.3}) \text{ (BUCHER, 1988)}$$

onde: A_c = redução de água (% em massa) para o teor de aditivo;

S_c = área de espalhamento da pasta com aditivo, em cm^2 ;

$(a/c)_o = 0,36$;

b, m = constantes da equação (B.2) para cada tipo de cimento.

Os ensaios são de fácil repetibilidade, pois cada determinação utiliza uma quantidade relativamente pequena de cimento (165 g). A variação dos resultados laboratoriais é de aproximadamente 4,4% (BUCHER, 1988).

B.2.3. Dosagem e Mistura

Utilizou-se o teor de 10% de sílica ativa, em relação à massa de cimento, tendo como referência estudos realizados por AGNESINI e SILVA (1997b) e AGNESINI e GOMES NETO (1998).

No estudo dos tempos de pega das pastas, utilizou-se o teor de 1,5% de superplastificante, em relação à massa de cimento. Já nas análises de mini-slump, os teores de superplastificante estudados variaram entre 0,5 e 2,0% em relação à massa de cimento, segundo as recomendações do fabricante.

As relações polímero/cimento (P/C) estudadas variaram de 1,25 a 10%, em massa. Sendo o teor de sólidos do látex igual a 50%, as relações látex/cimento utilizadas variaram de 2,5 a 20%, em massa.

As relações água/cimento apresentadas referem-se à quantidade total de água na mistura, inclusive a presente no látex e no aditivo superplastificante.

As pastas de cimento foram misturadas em argamassadeira de 0,3 Hp, com capacidade para 5 dm³, em velocidade média por 5 minutos. A ordem de mistura dos materiais foi a seguinte: 1º) cimento com 50% da água total; 2º) restante da água misturada previamente com os outros materiais.

B.3. Apresentação e discussão dos resultados

B.3.1. Tempo de pega

A Figura B.2 apresenta os valores dos tempos de início e fim de pega para as pastas de cimento Portland com sílica ativa, superplastificante e SB. Analisando-se os resultados apresentados, observa-se que, em relação à pasta de referência (sem adições), a utilização de sílica ativa e superplastificante ocasiona a redução dos tempos de início e fim de pega das pastas. Entretanto o uso de SB ocasionou um aumento significativo dos tempos de início e fim de pega, em relação à pasta de referência.

Segundo RAY et al. (1994), OHAMA (1998) e OLLITRAULT-FICHET et al. (1998), o aumento dos tempos de início e fim de pega em pastas de cimento

modificadas com SB ocorre em função do acúmulo de polímero ao redor do grão de cimento, retardando o processo de hidratação.

FIGURA B.2. Tempos de pega para pastas de cimento Portland

B.3.2. Método do “mini-slump”

Inicialmente foram traçadas as curvas de comportamento reológico, ou de sensibilidade à água, para as pastas de cimento com e sem sílica ativa, apresentadas na Figura B.3.

FIGURA B.3. Comportamento reológico do cimento com e sem sílica ativa (SA)

Verifica-se que o cimento utilizado apresenta alta sensibilidade à água, relativo à fluidez, ou seja, há um aumento significativo da área de espalhamento da pasta com o aumento da relação água/cimento. Entretanto apresenta-se uma significativa redução desse efeito com a adição de sílica ativa, resultado da elevada superfície específica dessa adição, diminuindo a fluidez da pasta.

A Figura B.4 apresenta os valores de redução de água decorrentes do uso do aditivo superplastificante nas pastas de cimento com e sem sílica ativa. Observa-se que, para os dois tipos de pasta, os valores de redução de água são crescentes com o aumento dos teores de superplastificante, sendo maior a eficiência deste aditivo na pasta de cimento com sílica ativa.

FIGURA B.4. Valores de redução de água para pastas de cimento Portland com superplastificante (SPA)

Analisando-se, os resultados apresentados na Figura B.5, observa-se que o SB provoca uma redução significativa da quantidade de água nas dosagens estudadas, sendo semelhantes os valores obtidos para os dois tipos de pasta.

FIGURA B.5. Valores de redução de água para pastas de cimento com SB

A Figura B.6 apresenta os valores da redução de água para pastas de cimento com 10% de sílica ativa, superplastificante e polímero SB. Os resultados de redução de água foram crescentes com o aumento dos teores de superplastificante e SB, indicando, assim, a ausência de uma eventual incompatibilidade no estado fresco, para as dosagens e materiais estudados.

FIGURA B.6. Redução de água de pastas de cimento com sílica ativa (10%), superplastificante e SB

B.4. Considerações sobre os resultados

Neste estudo, não se verificou incompatibilidade do uso conjunto de cimento Portland, sílica ativa, superplastificante e SB.

Verificou-se um aumento significativo dos tempos de início e fim de pega nas pastas modificadas com SB.

O superplastificante e o SB estudados apresentaram valores significativos de redução de água nas pastas de cimento, com e sem sílica ativa, apresentando, assim, alto potencial de utilização.

Os resultados obtidos para as pastas com 1,5% e 2% de superplastificante foram semelhantes, assim, adotou-se o teor de 1,5% para todas as dosagens dos concretos leves.

Verificou-se que os valores máximos de redução de água nas pastas com sílica ativa foram obtidos para o uso conjunto de superplastificante e SB.

Salienta-se que os valores de redução de água obtidos neste estudo, utilizando-se o método do mini-slump, não podem ser relacionados diretamente a concretos e argamassas.

DOSAGEM DOS CONCRETOS LEVES

C.1. Fundamentos da dosagem

A dosagem dos concretos leves de alto desempenho modificados com SB é uma tarefa um pouco mais complexa do que aquela utilizada para o concreto tradicional, consequência da utilização conjunta de cimento Portland, sílica ativa, aditivo superplastificante, látex de estireno butadieno, areia natural e agregados leves. Por isso, nesta pesquisa, desenvolveu-se um processo de dosagem experimental adequado para a obtenção dos concretos leves com as propriedades e características desejadas, sendo as principais:

- fator de eficiência⁸ mínimo aos 7 dias de idade de 25 MPa.dm³/kg, valor mínimo adotado para a designação de alto desempenho para concretos leves segundo SPITZNER (1994) e HOLM e BREMNER (1994);
- resistência à compressão aos 7 dias superior à 35 MPa, caracterizando o material como de alta resistência conforme classificação proposta por AMARAL FILHO (1992); e
- índice de consistência (NBR 7215) de 200 ± 10 mm, valor adotado de acordo com a trabalhabilidade necessária para moldagem de pré-fabricados de pequena espessura.

A metodologia para dosagem dos concretos, inteiramente experimental, baseou-se em três etapas principais: (1) estudo da composição granulométrica dos agregados leves; (2) determinação da quantidade de água total em função da trabalhabilidade dos concretos - determinação da relação água/materiais secos; e (3) estudo da variação das

⁸ Fator de eficiência = resistência à compressão / massa específica.

propriedades fundamentais dos concretos no estado endurecido em função da relação água/cimento.

Adotaram-se os teores de sílica ativa e aditivo superplastificante de 10% e 1,5%, respectivamente, em relação à massa de cimento, tendo como referência os estudos realizados por AGNESINI e GOMES NETO (1998) e GOMES NETO (1998).

As relações polímero/cimento (P/C) utilizadas foram 5 e 10%, em massa. Esses valores foram adotados analisando-se os resultados obtidos por AFRIDI et al. (1994), ACI (1995), SHAKER et al. (1997), FOLIC e RADONJANIN (1998), assim como OHAMA (1998).

Adotou-se a idade de 7 dias para caracterização das propriedades no estado endurecido dos concretos leves, considerando-se a utilização do material em pré-fabricados.

Etapa 1 – Estudo da composição granulométrica dos agregados leves

A determinação dos teores adequados de areia natural e argila expandida foi realizada pesquisando-se a granulometria ótima do agregado composto, visando a otimização das seguintes propriedades dos concretos leves: trabalhabilidade, massa específica, resistência à compressão e consumo de cimento. O estudo da composição granulométrica dos agregados foi dividida em duas partes, conforme apresentado a seguir.

A) Determinação do teor ótimo de cada tipo de agregado leve

Para a verificação do teor ótimo de proporcionamento entre as argilas expandidas Cinexpan 0500 e Cinexpan 1506, foram realizados estudos de distribuição granulométrica e massa unitária compactada com agregado seco.

A distribuição granulométrica da Cinexpan 1506 não se enquadra nos requisitos da NM 35/95 para agregados leves com dimensão até 9,5 mm (dimensão máxima característica adotada), como se pode verificar na Figura C.1. Assim, procurou-se ajustar a granulometria deste agregado, denominada agregado matriz, adicionando-se de 10 a 50% de argila expandida Cinexpan 0500, com dimensão máxima característica igual a 4,8 mm, em relação à massa total de agregado leve. Limitou-se em 50%, em massa, o teor máximo de argila expandida Cinexpan 0500 na composição final do

agregado leve com a intenção de evitar o aumento excessivo da massa específica dos concretos. As composições granulométricas das misturas dos agregados leves estudadas são apresentadas na Tabela C.1 e Figura C.1.

TABELA C.1. Composição do agregado leve

<i>Agregado</i>	<i>Mistura (% em massa)</i>				
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Cinexpan 0500	10	20	30	40	50
Cinexpan 1506	90	80	70	60	50

FIGURA C.1. Distribuição granulométrica das misturas da Tabela C.1

Analisando-se os resultados apresentados na Figura C.1, verifica-se que as misturas 4 e 5 foram as que mais se aproximaram dos requisitos da NM 35/95 quanto à distribuição granulométrica dos agregados leves. Entretanto, analisando a Tabela C.2, onde se apresentam os valores da massa específica das misturas, verifica-se que a mistura 5 foi a que apresentou o maior valor de massa unitária compactada a seco (NBR 7810) e o menor índice de vazios dentre as misturas estudadas, sendo, assim, adotada para dosagem dos concretos ao longo deste estudo.

B) Determinação do teor ideal de areia natural no agregado final

O objetivo principal da substituição parcial do agregado leve por areia natural quartzosa foi otimizar a composição granulométrica do agregado total, melhorando, assim, algumas características e propriedades dos concretos, tais como trabalhabilidade,

consumo de cimento e resistência mecânica. Fixou-se em 40% o teor máximo de areia natural adicionada ao agregado, em massa, tendo como referências as pesquisas realizadas por ZHANG e GJØRV (1991a) e AGNESINI e GOMES NETO (1998). As misturas estudadas dos agregados são apresentadas na Tabela C.3.

TABELA C.2. Valores da massa unitária das misturas de agregados leves

<i>Tipo de Mistura</i>	<i>Massa Unitária compactada com agregado seco (NBR 7810) (kg/dm³)</i>
1	0,75
2	0,77
3	0,81
4	0,82
5	0,85

TABELA C.3. Composição do agregado composto

<i>Agregado</i>	<i>Mistura (% em massa)</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Areia natural	10	20	30	40
Agregado leve ⁽¹⁾	90	80	70	60

⁽¹⁾ 50% de Cinexpan 0500 e 50% de Cinexpan 1506, em massa.

As propriedades analisadas dos concretos, para as quatro composições de agregados, foram: índice de consistência (NBR 7215), massa específica no estado fresco (NBR 9833), consumo de cimento, resistência à compressão com 1 e 7 dias (NBR 5739), massa específica seca (NBR 9778) e fator de eficiência aos 7 dia. O traço em massa empregado nos concretos foi 1:1 (cimento: agregado total) e relação a/c de 0,42. No agregado total, agregado leve foi composto pela mistura de 50% de Cinexpan 0500 e 50% de Cinexpan 1506, em massa. Os teores de sílica ativa e aditivo superplastificante utilizados foram 10% e 1,5%, respectivamente, em relação à massa de cimento e neste estudo não se utilizou SB. Os corpos-de-prova, cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, foram compactados utilizando vibrador de imersão.

Analisando-se os resultados (Tabela C.4), observa-se que os concretos preparados com as misturas de agregados 1 e 2 apresentaram valores de índice de consistência, em média, 10% inferiores aos concretos dosados com as misturas 3 e 4, e,

ainda, apresentaram segregação dos agregados leves durante o processo de compactação, ocasionada pela baixa coesão do concreto. Com isso, as misturas de agregados 1 e 2 foram desconsideradas do processo de dosagem.

TABELA C.4. Propriedades do concretos com diversos teores de areia.

<i>Propriedade</i>	<i>Mistura de agregados</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Índice de consistência (mm)	182	182	194	202
Massa esp. no estado fresco (kg/m ³)	1660	1660	1680	1750
Consumo de cimento (kg/m ³)	655	655	663	682
Resist. Compressão (MPa)	-	-	44,6	48,2
Massa esp. seca (kg/m ³)	-	-	1662	1737
Fator de eficiência (MPa.dm ³ /kg)	-	-	26,8	27,7

Os concretos dosados com as misturas de agregados 3 e 4 não apresentaram segregação dos agregados leves durante o processo de compactação. Esse fato pode ser atribuído ao aumento da coesão dos concretos com o aumento do teor de areia no agregado composto.

Verifica-se, também, que os valores do fator de eficiência foram semelhantes para os concretos com as misturas 3 e 4 de agregados. Com isso, adotou-se a mistura de agregados 3, pois, o concreto dosado com 30% de areia apresentou o menor valor de massa específica seca.

Dessa forma, o proporcionamento adotado para o agregado composto foi, em massa, 30% de areia natural fina e 70% de agregado leve, ou seja, 30% de areia natural fina, 35% de Cinexpan 0500 e 35% de Cinexpan 1506. A composição granulométrica do agregado composto é apresentada na Figura C.2.

Considerando-se os valores dos módulos de finura para o agregado composto (3,61), areia natural (2,0) e a mistura de 50% de cada tipo de argila expandida (4,32), o teor ótimo de areia pode ser determinado de acordo com a equação C.1. Substituindo-se os valores dos módulos de finura na equação C.1, obtém-se o teor ótimo de areia de 30% em relação ao agregado total, valor semelhante ao adotado neste estudo de dosagem.

FIGURA C.2. Curva granulométrica do agregado composto

$$A = ((MFt - MFarg) / (MFa - MFarg)) \times 100 \quad (C.1)$$

Onde: MFt = módulo de finura do agregado total;

MFa = módulo de finura da areia;

MFarg = módulo de finura da mistura de argila expandida.

Etapa 2- Determinação da quantidade de água total em função da trabalhabilidade dos concretos - determinação da relação ‘água/materiais secos’.

Para a determinação do teor de água em relação aos materiais secos dos concretos leves, o índice de consistência (NBR 7215) foi fixado em 200 ± 10 mm. Este valor foi fixado considerando-se os processos de produção e moldagem usuais dos concretos para componentes pré-fabricados.

Para a produção dos concretos, empregou-se um misturador do tipo planetário e os materiais foram misturados na seguinte seqüência: 1º) cimento, areia e 50% da água; 2º) restante da água com sílica ativa, superplastificante e SB, misturados previamente; 3º) agregado leve. Os materiais foram misturados até a obtenção de uma mistura homogênea, aproximadamente de 5 minutos para 40 dm^3 .

Os teores de água, em relação aos materiais secos, obtidos para o índice de consistência adotado foram de aproximadamente 20% para concretos sem SB, 17% para concretos com P/C = 5% e 16% para concretos com P/C = 10%. O valor do teor de água do concreto leve sem adição de SB foi o mesmo obtido em estudo realizado por

AGNESINI e GOMES NETO (1998) com concreto leve semelhante. As relações água/materiais secos obtidas foram adequadas para o processo de compactação dos concretos em mesa vibratória. Em nenhuma das dosagens estudadas observou-se a existência de segregação da argila expandida e de exsudação.

Etapa 3 - Estudo da variação das propriedades fundamentais dos concretos no estado endurecido em função da relação água/cimento.

HELENE (1995) desenvolveu estudos relacionados à resistência do concreto frente a determinados ambientes agressivos e apresentou valores limites da relação água/cimento em função da classe de concreto, considerando-se a corrosão das armaduras, fator fundamental em pré-fabricados esbeltos. Os parâmetros resultantes desse estudo estão indicados na Tabela C.5.

TABELA C.5. Classificação dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras

<i>Classe de Concreto (NBR-8953)</i>	Classe de Resistência	Máxima Relação <i>a/c</i>
Durável	≥C50	≤ 0,38
Resistente	C35 C40 C45	≤ 0,50
Normal	C25 C30	≤ 0,62
Efêmero	C10 C15 C20	Qualquer

Fonte: HELENE (1995)

Através de metodologia totalmente experimental, variando-se a relação água/cimento de 0,35 a 0,60 (em massa) foram determinados 15 traços para os concretos leves. As relações P/C utilizadas foram 5 e 10%, em massa. As relações de ‘água/materiais secos’ utilizadas para obter a consistência desejada foram 20, 17 e 16%, para concretos com relações P/C de 0, 5 e 10%, respectivamente.

As quantidades dos agregados utilizadas na composição do agregado final foram, em massa, 30% de areia natural, 35% de Cinexpan 0500 e 35% de Cinexpan 1506, respectivamente. Para todas as dosagens foram utilizados 10% de sílica ativa e 1,5% de aditivo superplastificante, teores relativos à massa de cimento. A Tabela C.6

apresenta os 15 traços, em massa, obtidos pela dosagem experimental dos concretos leves.

TABELA C.6. Proporcionamento dos concretos leves

Traço	Proporcionamento (em massa) <i>C:SA:A:C0500:C1506:SPA</i> ²	Relações a/c e a/agl (em massa) ¹ (Índice de Consist. = 200 ± 10 mm)					
		<i>P/C = 0%</i>		<i>P/C = 5%</i>		<i>P/C = 10%</i>	
		<i>a/c</i>	<i>a/agl</i>	<i>a/c</i>	<i>a/agl</i>	<i>a/c</i>	<i>a/agl</i>
1	1: 0,1: 0,27: 0,315: 0,315: 0,015	0,41	0,37	0,36	0,33	0,34	0,31
2	1: 0,1: 0,35: 0,403: 0,403: 0,015	0,45	0,41	0,39	0,36	0,37	0,34
3	1: 0,1: 0,42: 0,490: 0,490: 0,015	0,50	0,45	0,43	0,39	0,39	0,36
4	1: 0,1: 0,50: 0,578: 0,578: 0,015	0,54	0,49	0,45	0,41	0,42	0,38
5	1: 0,1: 0,57: 0,665: 0,665: 0,015	0,59	0,54	0,50	0,46	0,45	0,41

¹ Relações *a/c* e *a/agl* efetivas;

² cimento: sílica ativa: areia: Cinexpan 0500: Cinexpan 1506: superplastificante.

Após a determinação dos 15 traços de concretos leves, foram moldados 375 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, para determinação da resistência à compressão (NBR-5739), sendo 5 corpos-de-prova para cada idade (1, 3, 7, 28 e 63 dias) e tipo de concreto leve. Com os resultados, foram obtidas as funções específicas *resistência à compressão x relação água/cimento*, apresentadas nas Figuras C.3, C.4 e C.5 e na Tabela C.7.

Foram determinados, também, os valores da resistência à compressão aos 7 dias em função do consumo de cimento e da massa específica seca, conforme apresentado, respectivamente, nas Figuras C.6 e C.7.

FIGURA C.3. Resistência à compressão x relação a/c dos concretos sem SB

FIGURA C.4. Resistência à compressão x relação a/c dos concretos com $P/C = 5\%$

FIGURA C.5. Resistência à compressão x relação a/c dos concretos com $P/C = 10\%$

TABELA C.7. Funções específicas “resistência à compressão x relação a/c”

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)		
	P/C = 0%	P/C = 5%	P/C = 10%
1	$-42,25.\ln(x) + 2,75$	$-41,10.\ln(x) - 2,74$	$-11,72.\ln(x) + 20,90$
3	$-28,41.\ln(x) + 19,23$	$-36,71.\ln(x) + 6,06$	$-22,97.\ln(x) + 17,27$
7	$-33,47.\ln(x) + 22,04$	$-32,61.\ln(x) + 14,77$	$-21,04.\ln(x) + 21,97$
28	$-38,54.\ln(x) + 19,20$	$-33,63.\ln(x) + 15,62$	$-23,06.\ln(x) + 21,57$
63	$-27,36.\ln(x) + 27,85$	$-35,91.\ln(x) + 14,55$	$-15,55.\ln(x) + 30,85$

* x = relação água/cimento (em massa)

FIGURA C.6. Resistência à compressão aos 7 dias x consumo de cimento dos concretos leves

FIGURA C.7. Massa específica seca x resistência à compressão aos 7 dias dos concretos leves

Analisando-se as funções apresentadas na Tabela C.7, pode-se observar que, para todas as dosagens, os valores de resistência à compressão aos 7 dias foram superiores ao valor mínimo adotado de 35 MPa. Verifica-se, também, que a massa específica seca variou entre 1.450 e 1.600 kg/m³, resultando num fator de eficiência mínimo da ordem de 28 MPa.dm³/kg, superior ao valor limite de 25 MPa.dm³/kg.

Através de análise estatística dos resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos, foram obtidos valores médios de desvio padrão igual a 1,8% e coeficiente de variação de 4%. Portanto, na fixação da resistência de dosagem (f_{cj} , j = 7 dias), será adotado desvio padrão de 2 MPa, conforme prescrição da NBR 12655.

C.2. Exemplos de aplicação de dosagem dos concretos leves modificados com SB

Com base nos resultados encontrados nesta pesquisa, apresentam-se a seguir dois casos práticos e ilustrativos de dosagem dos concretos leves modificados com SB.

1º) Concreto com $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$

- Fixação da relação água/cimento (a/c)
Classe de concreto = Resistente; relação a/c máxima = 0,50 (Tabela C.5)
Resistência de dosagem- $f_{c7} = 40 + 1,65 \times 2 = 43,3 \text{ MPa}$;
relação a/c (Tabela C.7): P/C = 0% (0,53) (adotado = 0,50); P/C = 5% (0,42);
P/C = 10% (0,36).
- Cálculo da quantidade de agregado total
Teor de água/materiais secos : 20% (P/C = 0%), 17% (P/C = 5%) e 16% (P/C = 10%)
 - P/C = 0%: $m = ((100 \cdot 0,50) / 20) - 1,10 = 1,40 \Rightarrow 1 : 1,40 : a/c = 0,50$
 - P/C = 5%: $m = ((100 \cdot 0,42) / 17) - 1,15 = 1,32 \Rightarrow 1 : 1,32 : a/c = 0,42$
 - P/C = 10%: $m = ((100 \cdot 0,36) / 16) - 1,20 = 1,05 \Rightarrow 1 : 1,05 : a/c = 0,36$
- Desdobramento do traço total
Agregado: 30% areia, 35% Cinexpan 0500 e 35% Cinexpan 1506
O traço em massa obtido para o concreto será:
(cimento:areia:Cinexpan0500:Cinexpan1506:água:sílica ativa:SPA:P/C)
P/C = 0% $\rightarrow 1: 0,42: 0,49: 0,49: a/c = 0,50: SA = 0,1: SPA = 0,015$
P/C = 5% $\rightarrow 1: 0,40: 0,46: 0,46: a/c = 0,42: SA = 0,1: SPA = 0,015: P/C = 0,05$
P/C = 10% $\rightarrow 1: 0,32: 0,37: 0,37: a/c = 0,36: SA = 0,1: SPA = 0,015: P/C = 0,10$

As propriedades estimadas para os concretos são apresentadas na Tabela C.8.

TABELA C.8. Propriedades estimadas para os concretos ($f_{ck} = 40 \text{ MPa}$)

Propriedades		Concretos leves ($f_{ck} = 40 \text{ MPa}$)		
		P/C = 0%	P/C = 5%	P/C = 10%
Res. Compressão (Mpa) (Tabela C.7)	1 dia	32,0	32,9	32,9
	3 dias	38,9	37,9	40,7
	7 dias	45,2	43,1	43,5
	28 dias	45,9	44,8	45,1
	63 dias	46,8	45,7	46,7
Consumo de cimento (kg/m^3) (Figura C.6)		540	540	545
Massa esp. seca (kg/m^3) (Figura C.7)		1520	1530	1550
Fator de eficiência (7 dias) ($\text{MPa} \cdot \text{dm}^3/\text{kg}$)		29,7	28,2	28,1

2º) Microconcreto com consumo de cimento = 450 kg/m^3

- Resistência à compressão aos 7 dias (Figura C.3) e relação a/c (Tabela C.7):
 $P/C = 0\% - 40,5 \text{ MPa} \Rightarrow a/c = 0,58$
 $P/C = 5\% - 40,0 \text{ MPa} \Rightarrow a/c = 0,46$
 $P/C = 10\% - 40,0 \text{ MPa} \Rightarrow a/c = 0,42$
- Cálculo da quantidade de agregado total
 Teor de água/materiais secos : 20% ($P/C = 0\%$), 17% ($P/C = 5\%$) e 16% ($P/C = 10\%$)
 - $P/C = 0\%$: $m = ((100 \cdot 0,58) / 20) - 1,10 = 1,80 \Rightarrow 1 : 1,80 : a/c = 0,58$
 - $P/C = 5\%$: $m = ((100 \cdot 0,46) / 17) - 1,15 = 1,56 \Rightarrow 1 : 1,56 : a/c = 0,46$
 - $P/C = 10\%$: $m = ((100 \cdot 0,42) / 16) - 1,20 = 1,43 \Rightarrow 1 : 1,43 : a/c = 0,42$
- Desdobramento do traço total
 Agregado: 30% areia, 35% Cinexpan 0500 e 35% Cinexpan 1506
 O traço em massa obtido para o concreto será:
 (cimento:areia:Cinexpan0500:Cinexpan1506:água:silica ativa:SPA:P/C)
 - $P/C = 0\% \rightarrow 1: 0,54: 0,63: 0,63: a/c = 0,58: SA = 0,1: SPA = 0,015$
 - $P/C = 5\% \rightarrow 1: 0,47: 0,55: 0,55: a/c = 0,46: SA = 0,1: SPA = 0,015: P/C=0,05$
 - $P/C = 10\% \rightarrow 1: 0,43: 0,50: 0,50: a/c = 0,42: SA = 0,1: SPA = 0,015: P/C= 0,10$

As propriedades estimadas para os concretos são apresentadas na Tabela C.9.

TABELA C.9. Propriedades estimadas para os concretos ($C = 450 \text{ kg/m}^3$)

Propriedades		Concretos leves ($C = 450 \text{ kg/m}^3$)		
		$P/C = 0\%$	$P/C = 5\%$	$P/C = 10\%$
Res. compressão (MPa) (Tabela C.7)	1 dia	25,8	29,2	31,1
	3 dias	34,7	34,6	37,2
	7 dias	40,3	40,1	40,2
	28 dias	40,2	41,7	41,6
	63 dias	42,8	42,4	44,3
Massa esp. seca (kg/m^3) (Figura C.7)		1460	1510	1520
Fator de eficiência (7 dias) (MPa. dm^3/kg)		27,6	26,6	26,5

ANEXO D

ESTUDO DO PROCESSO DE CURA

Com a finalidade de avaliar o tempo ideal de cura nas primeiras idades dos concretos leves, realizou-se um estudo experimental sobre a influência do tempo de cura úmida em algumas propriedades dos concretos leves. As propriedades analisadas foram: resistências à compressão, resistência à tração por compressão diametral, retração por secagem e absorção de água por imersão. Este estudo mostra-se relevante tendo em vista a importância do tempo de cura do concreto leve no processo produtivo de elementos pré-fabricados.

D.1. Desenvolvimento Experimental

Para o estudo da influência dos processos de cura nas propriedades dos concretos, foi utilizada a dosagem 3 de concreto leve (Tabela C.6 – ANEXO C) com as relações P/C de 5 e 10%, em massa. As avaliações das resistências à compressão e à tração por compressão diametral foram realizadas segundo as recomendações da NBR 5739 e da NBR 7222, respectivamente, para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100mm de altura.

O estudo da retração por secagem dos concretos leves foi realizado segundo as recomendações da ASTM C-157/93, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos, com 75 mm de altura, 75 mm de largura e 285 mm de comprimento. As medidas de retração foram realizadas até a idade de 448 dias.

A análise da absorção de água por imersão foi realizada segundo as recomendações da NBR 9778, para a idade de 28 dias, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

A Tabela D.1 apresenta os processos de cura analisados, adotados segundo o estudo realizado por ROSSIGNOLO e AGNESINI (2000). Utilizou-se câmara úmida com temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de 95%. A água para imersão dos corpos-de-prova foi mantida a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$. A sala utilizada para “cura seca” apresentou temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$.

TABELA D.1. Processos de cura estudados

<i>Processo de Cura</i>	<i>Tempo de Cura (dias)</i>			
	<i>Fôrma (1º passo)</i>	<i>Cura Úmida</i>		<i>Cura Seca (4º passo)</i>
		<i>Câmara Úmida (2º Passo)</i>	<i>Imerso em Água (3º passo)</i>	
S	1	-	-	27
1C	1	1	-	26
2C	1	2	-	25
6C	1	6	-	21
2C4A	1	2	4	21
27C	1	27	-	-

D.2. Apresentação e discussão dos resultados

D.2.1. Resistência à compressão e à tração

Analisando-se os resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral dos concretos sem adição de SB, apresentados nas Figuras D.1 e D.2, pode-se verificar que os processos de cura que apresentaram melhor desempenho para as duas propriedades analisadas foram o 6C e o 27C. Assim, os resultados obtidos indicam que a cura úmida até a idade de 7 dias é fundamental para o desenvolvimento da resistência mecânica inicial dos concretos leves sem SB.

Com os resultados obtidos para os concretos modificados com P/C de 5%, apresentados nas Figuras D.3 e D.4, verifica-se que os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos para os processos de cura 1C e o 2C. Para a resistência à tração, o melhor processo de cura foi o 1C. Estes resultados indicam que, para os concretos modificados com P/C de 5%, os processos de cura úmida até idades avançadas não foram eficientes, indicando, assim, a possibilidade de se adotar a cura úmida somente nas primeiras idades.

FIGURA D.1. Resistência à compressão para concretos sem SB

FIGURA D.2. Resistência à tração para concretos sem SB

FIGURA D.3. Resistência à compressão para concretos com P/C de 5%

FIGURA D.4. Resistência à tração para concretos com P/C de 5%

Os resultados obtidos para os concretos leves modificados com P/C de 10%, apresentados nas Figuras D.5 e D.6, assim como os resultados obtidos para concretos com P/C de 5%, demonstram que para os concretos leves modificados com SB, os processos de cura úmida até idades avançadas não foram eficientes. Para as duas propriedades analisadas dos concretos modificados com P/C de 10%, o processo de cura 1C foi o que apresentou melhores resultados. O processo 2C também apresentou resultados satisfatórios com relação à resistência à compressão, sendo ligeiramente inferior aos obtidos para o processo 1C.

FIGURA D.5. Resistência à compressão para concretos com P/C de 10%

FIGURA D.6. Resistência à tração para concretos com P/C de 10%

Analizando-se os valores de resistência à compressão aos 28 dias dos concretos sem SB submetidos aos processos de cura analisados, verifica-se que a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi de 17%, indicando, assim, que o tempo de cura úmida nas primeiras idades tem grande influência na resistência à compressão deste material.

Para os concretos modificados com SB, os valores de resistência à compressão aos 28 dias indicam que o tempo de cura úmida tem menor influência sobre a resistência à compressão. A diferença entre os valores máximo e mínimo de resistência à compressão foi aproximadamente de 10% para os concretos com P/C de 5% e de 5% para os concretos com P/C de 10%, ou seja, com o aumento do teor de SB ocorre uma redução da variação da resistência à compressão, indicando, assim, a baixa eficiência do processo de cura úmida nos concretos leves modificados com SB.

Analizando-se os resultados da resistência à tração aos 28 dias para os três tipos de concretos, pode-se verificar também que, com o aumento do teor de SB, ocorre uma diminuição da variação entre os valores máximo e mínimo desta propriedade. O melhor desempenho desta propriedade para os concretos modificados com SB foi obtido para o processo de cura 1C.

A redução da eficiência da cura úmida nos concreto modificados com SB pode ser atribuída à diminuição da permeabilidade do material ocasionada pelo SB (OHAMA, 1998).

D.2.2. Retração por secagem

As Figuras D.7, D.8 e D.9 apresentam os resultados da avaliação da retração por secagem dos concretos leves sob as condições de cura 1C, 6C e 27C. Analisando-se os resultados dos concretos sem SB (Figura D.7), verifica-se que os corpos-de-prova expostos nas condições de cura 6C e 27C apresentaram comportamento semelhante, com valores médios de retração aos 448 dias de 730.10^{-6} mm/mm. Entretanto os corpos-de-prova expostos à condição de cura 1C apresentaram valores médios significativamente superiores de retração aos 448 dias, 920.10^{-6} mm/mm. Com isso, observa-se a importância da cura úmida nos primeiros 7 dias para a redução dos valores de retração por secagem dos concretos leves sem SB.

FIGURA D.7. Retração dos concretos leves sem SB

FIGURA D.8. Retração dos concretos leves com P/C de 5%

FIGURA D.9. Retração dos concretos leves com P/C de 10%

As Figuras D.8 e D.9 apresentam os valores de retração por secagem para os concretos leves modificados com P/C de 5 e 10%, respectivamente. Analisando os resultados, verifica-se que os corpos-de-prova expostos às condições de cura 1C e 6C apresentaram valores de retração semelhantes, com valores médios de 680.10^{-6} mm/mm para concretos com P/C de 5%, e 600.10^{-6} mm/mm para concretos com P/C de 10%.

Os concretos leves modificados com SB expostos à condição de cura 27C apresentaram valores de retração relativamente inferiores aos obtidos para as condições de cura 1C e 6C. Entretanto analisando-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração, apresentados anteriormente, pode-se verificar que os corpos-de-prova expostos à condição de cura 27C apresentaram redução significativa dos valores dessas propriedades.

Os valores de retração por secagem obtidos para os concreto leves estão de acordo com os valores normalmente obtidos para este tipo de concreto, que segundo HOLM & BREMNER (1994), variam de 500.10^{-6} a 1000.10^{-6} mm/mm, aos 400 dias de idade.

D.2.3. Absorção de água por imersão

A Figura D.10 apresenta os resultados da análise de absorção de água por imersão dos concretos leves aos 28 dias de idade, sob as condições de cura 1C, 6C e 27C. Analisando-se os resultados, observa-se que, para os concretos leves sem SB, os menores valores de absorção de água foram obtidos para os processos de cura 6C e 27C.

Para os concretos modificados com SB, os valores de absorção de água foram semelhantes para as condições de cura 1C e 6C.

FIGURA D.10. Absorção de água por imersão dos concretos leves

D.3. Considerações sobre o estudo do procedimento de cura

Verificou-se, com os resultados obtidos neste estudo de caso que, para os concretos leves de alto desempenho sem SB, a cura úmida nas primeiras idades, acima de 7 dias, é importante para assegurar o desenvolvimento das resistências à compressão e à tração. Em ocasiões excepcionais, pode-se adotar o processo de cura 6C para concretos sem SB, uma vez que as propriedades relacionadas à retração por secagem e à absorção de água por imersão foram semelhantes para os processos de 6C e 27C e os valores das resistências mecânicas iniciais obtidas para o processo 6C foram ligeiramente inferiores aos obtidos para o processo 27C.

Para os concretos leves modificados com SB, nos dois teores estudados (P/C de 5 e 10%), o processo de cura que apresentou melhor desempenho das propriedades mecânicas foi o 1C (1 dia em câmara úmida após desmoldagem). Quanto à retração e à absorção de água por imersão, os processos 1C e 6C apresentaram desempenho semelhante para as duas propriedades. Apesar do processo 27C apresentar o melhor desempenho de retração por secagem e absorção de água por imersão dos concretos leves modificados com SB, apresentou redução dos valores da resistência mecânica.

A possibilidade de redução do tempo de cura úmida dos concretos leves em função da utilização de SB contribui, significativamente, para o processo produtivo de pré-fabricados de pequena espessura.

Assim, de acordo com os resultados obtidos foram adotados os processo de cura 1C e 27C para os corpos-de-prova de concreto leve modificado com SB e sem SB, respectivamente, para a caracterização das propriedades destes materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFRIDI, M. U. K. et al. Water retention and adhesion of powdered and aqueous polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Composites*, v.17, p.113-118, 1995.
- AFRIDI, M. U. K. et al. Strength and elastic properties of powdered and aqueous polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, v.24, n.7, p.1199-1213, 1994.
- AFRIDI, M. U. K. et al. Morphology of Ca(OH)_2 in polymer-modified mortars and effect of freezing and thawing action on its stability. *Cement and Concrete Composites*, v.12, p.163-73, 1990.
- AFRIDI, M. U. K. et al. Behavior of Ca(OH)_2 in polymer modified mortars. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v.11, n.4, p.235-44, 1989.
- AGNESINI, M.V.C.; GOMES NETO, D.P. Microconcretos leves com argila expandida: influência da adição de sílica ativa no fator de eficiência em dosagem de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40. Rio de Janeiro, 1998. *Anais*.
- AGNESINI, M.V.C.; SILVA, L.S. Controle da resistência à compressão do concreto: estudo de utilização de corpos-de-prova cilíndricos de dimensões reduzidas. *Revista Engenharia e Arquitetura*, v.1, n.2, p.169-179, 1997a.
- AGNESINI, M.V.C.; SILVA, L.S. Concretos de alto desempenho: estudo de dosagem de microconcretos para pré-fabricados de pequena espessura. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28. São Carlos, 1997b. *Anais*, v.5, p.1985-1993.
- AGNESINI, M.C. Sistema construtivo com elementos pré-fabricados de argamassa armada: uma alternativa para a execução de pontilhões rodoviários em zonas urbanas e estradas vicinais. São Carlos, 1988. 319p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- AİTCIN, P.C. *Concreto de alto desempenho*. PINI, São Paulo, 2000.
- AİTCIN, P.C. Concretos of yesterday, today and tomorrow. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41. Salvador, 1999. *Anais*.

- ALDUAJI, A. et al. Lightweight concrete in hot coastal areas. *Cement and Concrete Composites*, n.21, p.453-458, 1999.
- ALLAN M.L. Rheology of latex-modified grouts. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.12, p.1875-84, 1997.
- AL-KHAIAT, H.; HAQUE, M.N. Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, v.26, n.6, p.859-866, 1998.
- AL-TAYYIB, A.J.; AL-ZAHRANI, M.M. Corrosion of steel reinforcement in polypropylene fibre reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, v.87, n.2, p.108-113, 1990.
- ALMEIDA, I.R. Superplastificantes, microssilica e durabilidade dos concretos. *Revista Técnica*, v.5, p.30-33, 1996.
- ALVES, R.R.; HELENE, P. Aditivos superplastificantes. *Revista Ibracon*, n.13, p.31-37, 1996.
- AMARAL FILHO, E.M. Concreto de Alta Resistência - 1ª parte. *Revista Ibracon*, n.4, p.40-49, 1992.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. ACI – 213R-87. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, 27p., 1997.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. State-of-the-art report on polymer-modified concrete. ACI – 548.3R-95. 47p, 1995.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures. ACI 209R-92. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete, 1992.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. Building Code requirements for reinforced concrete ACI 318-89 and commentary ACI 318R-89, 347p., 1992.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. Committee 363 – State of the art report on high strength concrete. American Concrete Institute Journal, 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM C 267 – 96. Chemical resistance of mortars, grouts, and monolithic surfacings and polymer concretes. 6p. Philadelphia, USA, 1996.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM C 157 – 93. Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. 6p. Philadelphia, USA, 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM C 125. Definitions of terms relating to concrete and concrete aggregates. In: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. Philadelphia, USA, 1993.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D 4404 – 87. Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry . Philadelphia, USA, 1992.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM C 418 – 90. Abrasion resistance of concrete by sandblasting. 3p. Philadelphia, USA, 1990.
- AQUINO, M.J.; LI, Z.; SHAH, S.P. Mechanical properties of the aggregate and cement interface. *Advances Cement Based Materials*, v.2, n.6, p.211-23, 1995.
- ARMELIN, H.S.; LIMA, M.G.; SELMO, S.M.S. Alta resistência com argila expandida. *Revista Ibracon*, n.09, p.42-47, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6474 (NM23) – Cimento Portland – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655 – Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM35 – Agregados leves para concreto estrutural – Especificações. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7224 (NM76) – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método do Blaine). Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953 - Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistências. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10342 – Concreto – Perda de abatimento. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11581 – Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11580 – Cimento Portland – Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11852 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768 – Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12127 – Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (peneira 200). Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733 – Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11173 – Projeto e execução de argamassa armada. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10786 – Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 – Determinação da composição granulométrica dos agregados. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776 – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833 – Concreto fresco – Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9937 – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9777 – Agregados – Determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9606 – Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 – Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211 – Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 – Argamassas de concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251 – Agregado em estado solto: determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7810 - Agregado em estado compactado a seco : determinação da massa unitária, especificação. 3p. Rio de Janeiro, 1982.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 1974.
- BALENDRAN, R.V.; PANG, H.W.; WEN, H.X.. Use of scanning electron microscopy in concrete studies. *Structural Survey*, v.16, n.3, 1998.
- BEELDENS, A. et al. Influence of polymer type on the structure of polymer modified cement mortar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 21. USA, 1999. *Proceedings*, p.59-71,
- BEN-DOR, L.; HEITNER-WIRUIN, C.; DIAB, H. The effect of ionic polymers on the hydration on C₃S. *Cement and Concrete Research*, v.15, p.681-86, 1985.
- BENTUR, A.; ODLER, I. Development and nature of interfacial microstructure. In: MASO J.C. *Interfacial Transition Zone in Concrete*. London, E & FN SPON, 1996. p.18-44.
- BENTUR, A.; COHEN, M.D. Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars. *Journal of the American Ceramic Society*, v.70, n.10, p.738-43, 1987.
- BENTZ, D.P.; GARBOCZI, E.J. Modeling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity. *Materials and Structures*, v.25, p.523-33, 1992.
- BERNER, D.E. High ductility, high strength lightweight aggregate concrete. In: ACI SYMPOSIUM ON PERFORMANCE OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE. Dallas, Texas, 1991. *Proceedings*.
- BREMNER, T.W. Concreto de agregado leve. *Revista técnica*, n.37, p.45-47, 1998.
- BREMNER, T.W.; HOLM, T.A.; McINERMEY, J.M. Influence of compressive stress on the permeability of concrete. In: ACI SYMPOSIUM ON PERFORMANCE OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE. Dallas, Texas, 1991. *Proceedings*.
- BREMNER, T.W., HOLM, T.A., DESOUSA, H. Aggregate-matrix interaction in concrete subjected to severe exposure. In: FIP-CPCI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE SEA STRUCTURES IN ARTIC REGIONS. Calgary, Canada, 1984. *Proceedings*.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS 8110 part 2. 1985.
- BUCHER, H.R.E. Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassa ou concretos. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30. Rio de Janeiro, 1988. *Anais*, v.2, p.609-625.
- BURG, R.G.; OST, B.W. Engineering properties of commercially available high-strength concretes. Research and Development Bulletin RD104T, Portland Cement Association. Skokie, 1992.
- CAMPBELL, D.H. Weathered clinker, clear belite, alkali-aggregate reaction testing, and simultaneous reflected- and transmitted-light observations. In:

- INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 19. USA, 1999. *Proceedings*, p.23-39,
- CARRASQUILLO, R.L.; NILSON, A.H.; SLATE, F.O. Properties of high strength concrete subject to short-term loads. *Journal of American Concrete Institute*, v.78, n.3, p.171-178, 1981.
- CASSA, J.C. et al. Avaliação da compatibilidade físico-química entre o cimento e o aditivo superplastificante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41. Salvador, 1999. *Anais*.
- CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. CEN-prEN 205-25. Béton. Performances, production et conformité. 67p., 1999.
- CHANDRA, S.; FLODIN, P. Interactions of polymer and organic admixtures on Portland cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v.17, p.875-90, 1987.
- CHEN, S.W.; SCHNEIDER, U. Microhardness and mechanical behavior of the expanded shale concrete. In: KATZ A. et al. *The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*. London, E & FN SPON, 1998. p.243-50.
- CHU, T. et al. Changes induced by PVA in the cement microstructure surrounding aggregate. In: MATERIALS RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM. Boston, 1994. *Proceedings*, v.370, p.347-55.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON – CEB. Règles unifiées communes aux différents types d'ouvrages et de matériaux. Code modèle CEB-FIP pour les structures en béton. Paris, 1978. (Bul. d'Inf. n.124-125)
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON and FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE – CEB-FIP. Lightweight aggregate concrete – Manual of design and technology. The Construction Press, 169p. 1977.
- COUTINHO, A.S. *Fabrico e propriedades do betão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2ª Ed., v.1, Lisboa, 1988.
- DALY, A.F. Use of lightweight aggregate concrete in bridges In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2. Kristiansand, Norway, 2000. *Proceedings*, p.345-354.
- DETWILER, R.J.; KJELSEN, K.O.; GJØRV, O.E. Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures. *ACI Materials Journal*, v.88, n.1, p.19-24, 1991.
- DIAMOND, S.; HUANG, J. The interfacial transition zone: Reality or myth? In: KATZ A. et al. *The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*. London, E & FN SPON, 1998.
- DIAMOND, S. The microstructure of cement paste in concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8. Rio de Janeiro, 1986. *Proceedings*, v.1, p.122-147.
- EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R2. LWAC Material Properties, State-of-the-Art. 111 p. 1998. (<http://www.sintef.no>)

- EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R9. Technical and economic mixture optimisation of high strength lightweight aggregate concrete. 64p. 2000a. (<http://www.sintef.no>)
- EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R11. Pumping of lightweight aggregate concrete based on expanded clay in Europe. 67p. 2000b. (<http://www.sintef.no>)
- EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R14. STRUCTURAL LWAC, Specification and guideline for materials and production. 71p. 2000c. (<http://www.sintef.no>)
- EUROLIGHTCON. Project BE96-3942/R15. Light Weight Aggregates. 26p. 2000d. (<http://www.sintef.no>)
- EVANGELISTA, A.C.J.; SHEHATA, L.C.D.; ALMEIDA, I.R. Características mecânicas de concretos leves de alta resistência com argila expandida, produzidos no Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. Florianópolis, 1996. *Proceedings*, p.170-189.
- FAGERLUND, G. Studier av fasgränser – Cementpasta i cementbruk och betong. Report 29, Inst. for Byggnadsteknik, Tekniska Högskolen, Lund, 1972.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎTE (FIP). Manual of lightweight aggregate concrete. Surrey University Press, Glasgow. 1983.
- FERREIRA JUNIOR, S. Concretos especiais para pavimentos: Uso do látex, microsilica e fibras de aço. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. São Paulo, 1997. Publicação ET-96.
- FERREIRA, O.P. Cobertura em argamassa armada: Uma alternativa para habitação de interesse social. São Paulo, 1991. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- FOLIC, R.J.; RADONJANIN, V.S. Experimental research on polymer modified concrete. *ACI Materials Journal*, v.95, n.4, p.463-69, 1998.
- FOWLER, D.W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement and Concrete Composites*, v.21, p.449-452, 1999.
- GJØRV, O.E.; MONTEIRO, P.J.M.; MEHTA, P.K. Effect of condensed silica fume on the steel-concrete bond. *ACI Materials Journal*, v.87, p.573-83, 1990.
- GOMES NETO, D.P. Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura – Estudo de caso. São Carlos, 1998. 156p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GRIMER, F.J.; HEWITT, R.E. The Form of the stress-strain curve of concrete interpreted with a diaphase concept of material behavior. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN CIVIL ENGINEERING MATERIALS. Southampton, 1969.
- GU, P.; XIE, P.; BEAUDOIN, J.J. Microstructural characterization of the transition zone in cement systems by means of a.c. impedance spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, v.23, p.581-91, 1993.

- HANAI, J.B. *Construções de argamassa armada: Fundamentos tecnológicos para projeto e execução*. PINI. São Paulo, 1992.
- HAQUE, M.N.; AL-KHAIAT, H. Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions. *Materials Structures*, v.32, p.533-538, 1999.
- HELENE, P.R.L. Concreto de alto desempenho: o melhor está por vir. *Revista Cimento Hoje*, n.20, 1999.
- HELENE, P.R.L. Vida útil das estruturas. *Revista Técnica*, n.17, p.28-31, 1995.
- HELENE, P.R.L. Concreto de elevado desempenho para o ano 2000. *Revista Politécnica*, n.207, p.37-39, 1992.
- HOLM, T.A. Specified density concrete – A transition. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2. Kristiansand, Norway, 2000. *Proceedings*, p.37-46.
- HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments. US Army Corps of Engineers - Engineer Research and Development Center. ERDC/SL TR-00-3. 116p. 2000.
- HOLM, T.A.; BREMNER, T.W. High Strength Lightweight Aggregate Concrete. In: SHAH S.P.; AHAMAD S.H. *High Performance Concrete: Properties and Applications*. Great Britain, McGraw-Hill, 1994. p.341-374.
- HOLM, T.A.; BREMNER, T.W.; NEWMAN, J.B. Lightweight aggregate concrete subject to severe weathering. *Concrete International*, v.6, n.6, p.49-54, 1984.
- HOFF, G.C. High strength lightweight concrete for Arctic applications. In: ACI SYMPOSIUM ON PERFORMANCE OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE. Dallas, USA, 1991.
- IKEDA, S. Recent developments in LWAC in Japan. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2. Kristiansand, Norway, 2000. *Proceedings*, p.16-26.
- JAKOBSEN, U.H. Understanding the features observed in concrete using various fluorescence impregnation techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 20. Mexico, 1998. *Proceedings*, p.2281-301.
- JAKOBSEN, U.H.; JOHANSEN, V.; THAULOW, N. Optical microscopy – a primary tool in concrete examination. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 19. USA, 1997. *Proceedings*, p.275-95.
- JANOTKA, I. et al. Behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in presence of the set styrene-acrylate dispersion. *Cement and Concrete Research*, v.25, p.1727-35, 1996.
- JIANG, W.; ROY, D.M. Microstructural aspects of high-performance cement-based materials. In: MATERIALS RESEARCH SOCIETY SYMPOSIUM. Boston, 1994. *Proceedings*, v.370, p.115-25.

- KANTRO, D.L. Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste – A Miniature Slump Test. *Cement, Concrete and Aggregate*, v.2, n.2, p.95-102, 1980.
- KHOKHRIN, N.K. The durability of lightweight concrete structural members. Kuibyshev, USSR, 1973.
- KOBAYASHI, K.; HATTORI, A.; MIYAGAWA, T. Characters of interfacial transition zone cement with admixtures. In: KATZ, A. et al. *The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*. London, E & FN SPON, 1998. p.311-17.
- KJELSEN, K.O.; WALLEVIK, O.H.; FJÄLLBERG, L. Microstructures and microchemistry of the paste-aggregate interfacial transition zone of high-performance concrete. *Advances in Cement Research*, v.10, n.1, p.33-40, 1998.
- LAAMANEN, P.H. High strength LWA concrete for bridge construction – The new Sundru Bridge in Eidsvoll. In: UTILISATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE, LILLEHAMMER SYMPOSIUM. Norway, 1993. *Proceedings*, p.517-26.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – LNEC. Betões: Análise macro e micro-estrutural – Exame petrográfico. Especificação LNEC E388, 18p. 1993.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – LNEC. Betões: Preparação de lâminas delgadas para análise micro-estrutural. Especificação LNEC E389, 2p. 1993.
- LARBI, J.A.; BIJEN, J.M.J.M. Interaction of polymers with Portland cement during hydration: a study of the chemistry of the pore solution of polymer-modified cement systems. *Cement and Concrete Research*, v.20, p.139-47, 1990.
- LEEMAN, M.E.; SARKAR, S.L. Petrographic identification of quality control failure in a concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 18. USA, 1996. *Proceedings*, p.480-93.
- LO, Y.; GAO, K.F.; JEARY, A.P. Microstructure of pre-wetted aggregate on lightweight concrete. *Building and Environment*, vol 34, p.759-64, 1999.
- MALHOTRA, V.M. Properties of high-strength lightweight concrete incorporating fly ash and silica fume. American Concrete Institute SP 121, p.645-66. 1990.
- MALHOTRA, V.M. CANMET Investigations in the development of high-strength concrete. In: SYMPOSIUM ON THE UTILIZATION OF HIGH STRENGTH CONCRETE. Stavanger, Norway, 1987. *Proceedings*.
- MASO, J.C. Influence of the interfacial transition zone on composite mechanical properties. In: MASO, J.C. *Interfacial Transition Zone in Concrete*. London, E & FN SPON, 1996. p.103-16.
- MAYS, G.C.; BARNES, R.A. The performance of lightweight aggregate concrete structures in service. *The Structural Engineer*, v.69, n.20, p.351-61, 1991.
- MEHTA, K.; AITCIN, P.C. Principles underlying the production of high-performance concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, v.12, n.2, p.70-78, 1990.

- MEHTA, K.; MONTEIRO, J.M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. PINI. São Paulo, 1994.
- MELBY, K.; JORDET, E.A.; HANSVOLD, C. Long-span bridges in Norway constructed in high-strength LWA concrete. *Enginnering Structures*, v.18, n.11, p.845-49, 1996.
- MENTONY et al. Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. *Cement and Concrete Research*, v.31, p.1359-65, 2001.
- MITIDIERI, A. Agregados leves em pré-moldados de concreto. In: COLÓQUIO SOBRE PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO. IBRACON. São Paulo, 1976.
- MONTEIRO, P.J.M. Caracterização da microestrutura do concreto: Fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração. São Paulo, 1993. Tese (livre docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MONTEIRO, P.J.M.; METHA, P.K. Effect of aggregate, cement, and mineral admixtures on the microstructure of the transition zone. Invited Paper, MRS Society, Boston, 1988.
- MONTEIRO, P.J.M.; METHA, P.K. Interaction between carbonate rock and cement paste. *Cement and Concrete Research*, v.16, p.127-32, 1986.
- MONTEIRO, P.J.M. Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties. Berkeley, 1985. PhD dissertation - University of California.
- MORENO, J. Lightweight concrete ductility. *Concrete International*, v.8, n.11, p.15-18, 1986.
- NEVILLE, A.M. Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete. *ACI Materials Journal*, v.94, n.1, p.71-74, 1997a.
- NEVILLE, A.M. *Propriedades do Concreto*. PINI, São Paulo, 1997b.
- NORWEGIAN COUNCIL FOR BUILDING STANDARTIZATION. NS 3473 E 1992 – Concrete structures design rules. Oslo. 78p. 1992.
- NOUMOWÉ A.; AGGOUN, S.; CABRILLAC, R. Mechanical properties of lightweight aggregate concrete after exposure at high temperature. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2. Kristiansand, Norway, 2000. *Proceedings*, p.641-649.
- OHAMA, Y. Polymer-based Admixtures. *Cement and Concrete Composites*, n.20, p.189-212, 1998.
- OHAMA, Y. Recent research and development in polymer-modified mortar and concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON POLYMER IN CONCRETE. Salvador, Brasil, 1993. *Proceedings*.
- OHAMA, Y. Pore size distribution and oxygen diffusion resistance of polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research*, v.21, p.309-315, 1991.

- OHAMA, Y. Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified of latex-modified mortars and concretes. *ACI Materials Journal*, n.84, p.511-518, 1987.
- OHAMA, Y.; KAN, S. Effects of specimen size on strength na drying shrinkage of polymer-modified concrete. *The International Journal of Cement Composites na Lightweight Concrete*, v.4, n.4, 1982.
- OKBA, S.H.; EL-DIED, A.S.; REDA M.M. Evaluation of the corrosion resistance of latex modified concrete (LMC). *Cement and Concrete Research*, v.27, n.6, p.861-868, 1997.
- OLLITRAULY-FICHET, R. et al. Microstructural aspects in a polymer-modified cement. *Cement and Concrete Research*, v.28, n.12, p.1687-93, 1998.
- OLLIVIER J.P.; MASO, J.C.; BOURDETTE, B. Interfacial Transition Zone in Concrete. *Advanced Cement Based Materials*, n.2, p.30-38, 1995.
- PAULON, V.A. Interface entre a pasta de cimento e agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 37. Goiânia, 1996. *Anais*, v.1, p.479-492.
- PAULON, V.A. Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado. São Paulo, 1991. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- PHILEO, R.E. Lightweight concrete in bridges. *Concrete International*, v.8, n.11, p.19-22, 1986.
- PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R.; ARMELIN, H.S.; HELENE, P. Pega acelerada no projetado: compatibilidade cimento/aditivo acelerador de paga para concreto projetado. *Revista Ibracon*, n.11, p.25-32, 1994.
- RAY, J.A. Things petrographic examination can and cannot do with concrete part two, some basics and guidelines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 22. USA, 2000. *Proceedings*, p.65-79.
- RAY, I.; GUPTA, A.P.; BISWAS, M. Physicochemical studies on single and combined effects of latex and superplasticiser on Portland cement Mortar. *Cement and Concrete Composites*, v.18, p.343-355, 1996.
- RAY, I.; GUPTA, A.P.; BISWAS, M. Effect of latex and superplasticiser on Portland cement mortar in the hardened state. *Cement and Concrete Composites*, v.17, p.9-21, 1995.
- RAY, I.; GUPTA, A.P.; BISWAS, M. Effect of latex and superplasticiser on Portland cement mortar in the fresh state. *Cement and Concrete Composites*, v.16, p.309-316, 1994.
- RILEN – INTERNATIONAL UNION OF TESTING AND RESEARCH LABORATORIES FOR MATERIALS AND STRUCTURES. Terminology and Definitions of Lightweight Concrete, 6p. 1975.
- ROSSIGNOLO, J.A. Propriedades da argamassa de cimento Portland modificada com látex estireno-butadieno para revestimento de fachadas. São Carlos, 1999. 107p.

- Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROSSIGNOLO, J.A.; PAULON, V.A.; AGNESINI, M.V.C. Concreto leve de elevado desempenho. *Revista Engenharia e Construção*, n.56, p.24-30, 2001.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C.; MORAIS, J.A. Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, v.25, n.1, p.77-82, 2003.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, v.32, n.3, p.329-334, 2002.
- ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Influência do tipo de cura nas propriedades mecânicas dos microconcretos leves de alto desempenho modificados com polímero para pré-fabricados de pequena espessura. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29. Montevideu, Uruguai, 2000. *Anais*.
- SANTOS, A.L.F. et al. Concreto leve de alto desempenho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 36. Porto Alegre, 1994. *Anais*, p.505-18.
- SANTOS, M.E. et al. Argila expandida como agregado para concreto leve. Tema livre – Apresentado à Reunião Anual do IBRACON de 1986. São Paulo, 1986.
- SAIJA, L.M. Waterproofing of Portland cement mortars with a specially designed polyacrylic latex. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.3, p.503-509, 1995.
- SAKAI, E.; SUGITA, J. Composite mechanism of polymer modified cement. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.1, p.127-35, 1995.
- SARKAR, S.L.; CHANDRA, S.; BERNTSSON, L. Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, v.14, p.239-48, 1992.
- SARKAR, S.L.; AITCIN, P.C.; DJELLOULI, H. Synergistic roles of slag and silica fume in very high-strength concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, v.12, n.1, p.800-808, 1990.
- SCRIVENER, K.L.; BENTUR, A.; PRATT, P.L. Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes. *Advances in Cement Research*, v.1, n.4, p.230-7, 1988.
- SEABROOK, P.I.; WILSON, H.S. High strength Lightweight concrete for use in offshore structures: utilisation of fly ash and silica fume. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v.10, n.3, p.183-92, 1988.
- SERRA, G. Tecnologia emergente atrai arquitetos do futuro. *Revista Cimento Hoje*, n.9, p.1, 1997.
- SHAKER, F.A. et al. Durability of styrene-butadiene latex modified concrete. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.5, p.711-720, 1997.

- SILVA, D.A.; ROMAN, H.R.; GLEIZE, P.J.P. Evidences os chemical interaction between EVA and hydrating Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v.32, p.1383-90, 2002.
- SILVA, I.J. Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. São Carlos, 2000. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SILVA, I. J. Contribuição ao estudo da utilização da resina poliuretana a base de óleo de mamona na Construção Civil. São Carlos, 1996. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SILVA, L. F. Comportamento à flexão de placas de argamassa armada com fibras de aço onduladas. São Paulo, 1990. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SISEL, D.A. The state of the art abd future trends in the strutural design of high-rise buildings. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE EDIFÍCIOS DE CONCRETO DE GRANDE ALTURA. IBRACON. São Paulo, 2000.
- SLATE, F.O.; NILSON, A.H.; MARTÍNEZ, S. Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete. *ACI Materials Journal*, v.83, n.4, p.606-613, 1986.
- SOBRAL, H.S. Concretos leves estruturais: Tipos e comportamento estrutural. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. São Paulo, 1996. Publicação ET-86.
- SPITZNER, J. High-Strength LWA Concrete. In: High-Strength Concrete. RILEM Cap.II – Aggregates. 1994.
- STORTE, M.. *Látex estireno butadieno: aplicações em concretos de cimento e polímero*. Palanca Editora Técnica Ltda. São Paulo, 1991.
- STUTZMAN, P.E.; CLIFTON, J.R. Specimen preparation for scanning electron microscopy. In: INTERNATONAL CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 21. USA, 1999. *Proceedings*, p.10-21.
- SU, Z.; BIJEN, J.M.J.M.; LARBI, J.A. Influence of polymer modification on the hydration of the Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v.21, p.535-44, 1991a.
- SU, Z.; BIJEN, J.M.J.M.; LARBI, J.A. The influence of polymer modification on the adhesion of cement pastes to aggregates. *Cement and Concrete Research*, v.21, p.727-36, 1991b.
- SU, Z.; LARBI, J.A.; BIJEM, J.M.J.M. The interface between polymer-modified cement paste and aggregates. *Cement and Concrete Research*, v.21, p.938-90, 1991.
- SU, Z. et al. The evolution of the microstructure in styrene acrylate polymer-modified cement pastes at early stage of cement hydration. *Advanced Cement Based Materials*, v.3, p.87-93, 1996.
- TAYLOR, H.F.W.; NEWBURY, D.E. An electron microprobe study of a mature cement paste. *Cement and Concrete Research*, v.14, p.565-73, 1984.

- TEZUKA, Y. Concreto de cimento e polímero. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. São Paulo, 1988.
- TEZUKA, Y. Concretos Polímeros. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – ITP. São Paulo, 1979.
- TEZUKA, Y. Concreto leve à base de argila expandida. São Paulo, 1973. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- TORRES, A.J. Influência da alta temperatura nas propriedades mecânicas do concreto leve de alto desempenho (CLAD). São Carlos, 2002. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, M.G. Betões de elevado desempenho com agregados leves – Durabilidade e microestrutura. Lisboa, Portugal, 2000. Dissertação (mestrado) - Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- VIEIRA, M.G.; GONÇALVES, A. Durability of high performance LWAC. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2. Kristiansand, Norway, 2000. *Proceedings*, p.767-73.
- WALTERS, D. G. Comparasion of latex-modified Portland cement mortars. *ACI Materials Journal*, v.87, n.4, p.371-377, 1990.
- WALTERS, D. G. Latex hydraulic cement additives. *Trasnpotation Research Record* 1204, p.71-76, 1988.
- WALTERS, D. G. What are Latexes? *Concrete International: Design & Constrution*, v.9, n.12, p.44-47, 1987.
- WASSERMAN, R.; BENTUR, A. Interaction between fly ash aggregate with cement paste matrix. In: KATZ A. et al. *The Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*. London, E & FN SPON, 1998. p.267-75.
- WASSERMAN, R.; BENTUR, A. Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.4, p.525-37, 1997.
- WASSERMAN, R.; BENTUR, A. Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength. *Cement and Concrete Composites*, v.18, p.67-76, 1996.
- WILSON H.S.; MALHOTRA, V.M. Development of high strength lightweight concrete for structural applications. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, v.10, n.2, 1988.
- YANAI, S. et al. Study on mix proportion for self compacting high performance lightweight aggregate concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE, 2. Kristiansand, Norway, 2000. *Proceedings*, p.774-783.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Penetration of cement paste into lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*, v.22, p.47-55, 1992.

- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v.88, n.3, p.240-247, 1991a.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, v.88, n.2, p.150-158, 1991b.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Permeability of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, v.88, n.5, p.463-469, 1991c.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Microstructure of the interfacial zone between lightweight concrete and cement paste. *Cement and Concrete Research*, v.20, p.610-618, 1990a.
- ZHANG, M.H.; GJØRV, O.E. Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, v.20, p.884-90, 1990b.