

PAULO EDUARDO FONSECA DE CAMPOS

**DA ARGAMASSA ARMADA AO MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO:
PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO PARA A PRÉ-FABRICAÇÃO LEVE**

Tese apresentada à Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Arquitetura e Urbanismo

São Paulo, 2002

PAULO EDUARDO FONSECA DE CAMPOS

*Arquiteto e urbanista, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Pontifícia
Universidade Católica de Campinas, 1981*

*Mestre em engenharia civil, Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo, 1989*

**Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: perspectivas
de desenvolvimento para a pré-fabricação leve**

Tese apresentada à Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Gomes Serra

São Paulo, 2002

*Ao amigo e jovem pesquisador, Artur José (in memoriam),
que tão prematuramente deixou o nosso convívio*

AGRADECIMENTOS

No momento em que se conclui um trabalho que significa a materialização de tantas horas de dedicação, reflete-se sobre a própria existência e as convicções pessoais que animaram o pesquisador a buscar, nos limites de suas forças e suas capacidades, trazer a sua contribuição para o desenvolvimento da ciência e tecnologia. Ao olhar para trás, no entanto, percebe-se cada vez mais nitidamente que a atividade desenvolvida também foi fruto da cooperação e do trabalho comum entre muitos indivíduos, pessoas que direta ou indiretamente influenciaram decisivamente no processo de obtenção deste produto final. Citá-las aqui é mais do que um dever de gratidão. É uma maneira singela de dizer: Obrigado!

Início pelo Prof. Dr. Geraldo Gomes Serra, orientador e maior incentivador para que eu viesse a desenvolver este trabalho, cujo conhecimento e a experiência sempre estiveram ao meu lado.

Ao Dr. Eng^o Carlos Eduardo de Siqueira Tango, pesquisador do IPT, agradeço a co-orientação na etapa de consecução das bases empíricas da pesquisa, quer nos levantamentos de campo quer nos estudos de dosagem.

Mesmo correndo o risco de alguma omissão, não posso deixar de expressar a minha gratidão a profissionais e amigos a quem devo muito de minha formação e de minha motivação em seguir adiante com este trabalho. Os meus agradecimentos a:

Prof. Dr. João Bento de Hanai

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Prof. Dr. Vahan Agopyan

Dr. Eng^o Julián Salas Serrano

Eng^o José Adolfo Peña

Arq. João Filgueiras Lima

Dra. Geól. Mírian Cruxên de Barros

MSc. Quím. Valdecir A. Quarcioni

Prof. Dr. Cláudio Sbrighi

Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs

Prof. Dr. Jefferson Libório

Eng^a Célia Martins Neves

Aos colegas do IPT, particularmente aos técnicos do Laboratório de Concreto, agradeço a forma amável e companheira como me acolheram durante o período em que realizei os ensaios experimentais.

Meu muito obrigado também aos colegas da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, especialmente do Departamento de Tecnologia, e do Núcleo de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo da USP.

Devo destacar o apoio prestado pela FAPESP-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, instituição à qual estive vinculado como bolsista e cuja colaboração foi imprescindível para a realização da pesquisa.

À Pavi do Brasil Pré-fabricação, Tecnologia e Serviços, nas pessoas do Sr. Alberto Tomás Vieira e do Eng^o Paulo Casal, agradeço as condições oferecidas de modo a facilitar a conclusão da redação deste trabalho.

Finalmente, é preciso falar de Lourdes, Bruna e Leonardo, esposa e filhos, que pacientemente suportaram as privações provocadas pela minha dedicação ao trabalho acadêmico, doando seu carinho incondicional a todo momento. A eles, à minha querida mãe, ao meu amoroso pai (in memoriam) e aos meus demais familiares, a minha maior gratidão.

“Que a ciência seja uma construção nunca concluída à qual cada um, nos limites de suas forças e suas capacidades, possa trazer a sua contribuição; que a colaboração, a cooperação e, portanto, a criação de ‘institutos’ sociais e lingüísticos adequados sejam essenciais para o progresso da ciência; que a pesquisa científica tenha como finalidade o benefício não de uma única pessoa, raça ou grupo, mas de todo o gênero humano; que, de qualquer forma, o desenvolvimento ou o crescimento da própria pesquisa seja algo mais importante do que cada indivíduo que a executa...”

Paolo Rossi em “Os Filósofos e as Máquinas” (1989)

SUMÁRIO

CAP. 1 – APRESENTAÇÃO	1
A RECENTE TRAJETÓRIA DA ARGAMASSA ARMADA NO BRASIL	7
CAP. 2 – ANTECEDENTES	12
A PRÉ-FABRICAÇÃO NOS DIAS ATUAIS	12
TECNOLOGIAS “LOW-TECH” PARA VENCER OS DESAFIOS DA ESCASSEZ	18
DO ARQUITETO-AUTOR AO ARQUITETO-ATOR	22
A APLICAÇÃO DOS NOVOS CONHECIMENTOS	26
CAP. 3 – COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	30
ALGUMAS PREMISSAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DELGADOS DE ÚLTIMA GERAÇÃO	33
O ESTÁGIO ATUAL DA PRÉ-FABRICAÇÃO LEVE	35
O MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	39
APRESENTAÇÃO DA TESE	43
CAP. 4 – METODOLOGIA	51
PLANO DE TRABALHO	52
FORMULAÇÃO DAS CONCLUSÕES	61

CAP. 5 – EMBASAMENTO TEÓRICO	63
A UTOPIA MODERNA DO “PREFABISMO” NO BRASIL	63
QUESTIONAMENTO DO MODELO	66
REVISÃO E RESTABELECIMENTO DE PARADIGMAS	72
CAP. 6 – BASE EMPÍRICA	82
INSPEÇÕES TÉCNICAS	83
PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO	89
AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
CONCLUSÕES PARCIAIS	95
CAP. 7 – ESTUDOS DE DOSAGEM: PREMISSAS	99
MICROESTRUTURA DA MATRIZ E MECANISMOS DE FISSURAÇÃO	100
RESISTÊNCIA DO CONCRETO À COMPRESSÃO SIMPLES	103
A INFLUÊNCIA DOS SUPERPLASTIFICANTES E DA SÍLICA ATIVA	105
CAP. 8 –PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS: METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS	109
PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM PASSO-A-PASSO	111
CAP. 9 – ENSAIOS REALIZADOS	130
SÉRIE DE ENSAIOS Nº 1: PROBLEMAS E REVISÃO DE PROCEDIMENTOS	130

SÉRIE DE ENSAIOS Nº 2: AJUSTES E CONFIRMAÇÃO PARCIAL DAS HIPÓTESES	139
CAP. 10 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURABILIDADE DO MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	154
A QUESTÃO DA DURABILIDADE EM FOCO	154
VIDA ÚTIL E ADEQUAÇÃO TECNOLÓGICA	157
A OPÇÃO PELA ANÁLISE PETROGRÁFICA	162
CAP. 11 – CONCLUSÕES	184
NEM TUDO O QUE RELUZ É OURO	187
NOVO CONHECIMENTO PRODUZIDO: A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA	191
PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	193
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	206

RESUMO

Apresenta-se inicialmente neste trabalho, um quadro de referência sobre a experiência adquirida no Brasil, após mais de quatro décadas, no desenvolvimento de estruturas de elementos pré-fabricados delgados de concreto armado. O advento das grandes fábricas de sistemas e componentes construtivos empregando a argamassa armada nas décadas de 80 e 90, representa uma das experiências mais relevantes e reconhecidas no campo da industrialização da construção no país, quase única em termos internacionais.

Aborda-se, por sua vez, os limites que vêm dificultando a retomada do desenvolvimento desta tecnologia, especialmente em função dos questionamentos quanto aos aspectos relacionados à sua durabilidade.

Parte-se da hipótese inicial de que a matriz da argamassa armada é potencialmente um microconcreto de alto desempenho, seja pelas suas propriedades de elevada resistência à compressão seja pela sua baixa porosidade, quando aplicada segundo a configuração prescrita na norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada”.

Busca-se demonstrar o potencial elevado desempenho da matriz da argamassa armada, através da análise dos resultados de inspeções feitas em obras construídas nas últimas duas décadas e de ensaios realizados em laboratório.

Posteriormente são apresentados resultados de ensaios de resistência e análises de durabilidade realizados no âmbito da pesquisa, respaldados em estudos de dosagem da matriz cimentícia.

Finalmente, a partir da avaliação dos resultados propõe-se o desenvolvimento de um microconcreto de alto desempenho para aplicação na pré-fabricação leve, como um sucedâneo, com incremento na qualidade, da matriz da argamassa armada, numa analogia direta com o concreto de alto desempenho.

Palavras-chave: pré-fabricação, estruturas laminares, microconcreto, concreto de alto desempenho

ABSTRACT

This work presents initially a reference table on the experience acquired over four decades in Brazil in the development of structures of thin wall precast elements of reinforced concrete. The advent of great plants of building systems and components using ferrocement in the 1980's and 1990's represents one of the most relevant and acknowledged experiences in building industrialization in the country, almost single in international terms.

The limits that have been hindering the development of this technology are broached, particularly the ones regarding uncertainties about aspects related to its durability.

The initial hypothesis that the ferrocement matrix is potentially a high-performance microconcrete is assumed, whether for its properties of high compressive strength or for its low porosity when applied according to the configuration prescribed in the Brazilian standard NBR-11.173 of "Design and execution of ferrocement".

The study analyses the results of inspections performed in buildings constructed in the last two decades and laboratory tests, in order to demonstrate the potential high performance of the ferrocement matrix.

After that, the results of compressive strength tests and durability analysis proceeded in the scope of the research are presented, supported by mix studies of the cementitious matrix.

Finally, based on the evaluation of the results, the development of high-performance microconcrete is proposed to be used in lightweight prefabrication building as a substitute, with improvement in quality, for the ferrocement matrix, in direct analogy with high-performance concrete.

Key-words: prefabrication, thin wall structures, microconcrete, high performance concrete

CAP. 1 - APRESENTAÇÃO

Não é possível compreender o espírito do movimento moderno na arquitetura sem entender a convicção na ciência e na técnica que se encontra em sua origem. A crença original dos modernos no caráter permanentemente progressivo e cumulativo do conhecimento científico, por sua vez, dão a certeza de que também a pesquisa em tecnologia da arquitetura é uma atividade cooperativa, em permanente revolução, decorrente do trabalho coletivo de vários grupos de estudiosos de um determinado tema.

Portanto, o conhecimento em arquitetura, enquanto tanto, significa necessariamente: saber inteligível, transmissível, reproduzível e mutável, ou seja, passível de aperfeiçoamento em meio ao seu próprio processo de desenvolvimento.

A história da arquitetura moderna narra na sua origem as sucessivas revoluções ocorridas no desenvolvimento da indústria e como elas influenciaram os processos construtivos. Além de novos materiais, tais como o vidro e o ferro, os projetos de pontes, grandes naves industriais, estações de estrada de ferro etc. exigiram o restabelecimento de uma linguagem arquitetônica adequada às realidades e utopias que se encontravam na segunda metade do século XIX.

Um papel particular coube ao concreto armado a partir de 1824, quando o inglês Joseph Aspdin patenteou o aglomerante mais popular do mundo: o cimento portland. Nas mãos de Lambot (1856) o cimento ganhou a forma do *ferciment* ou ferrocimento, material com o qual se podia produzir componentes construtivos pré-fabricados delgados, capazes de substituir a madeira, segundo sua idéia inicial. Posteriormente, é Monier quem aproveita aquelas características do ferrocimento na produção seriada de componentes pré-fabricados para pequenas obras, dando origem ao desenvolvimento do concreto armado (HANAI, 1992).

A plasticidade do concreto permite a execução de um número quase ilimitado de formas e acabamentos superficiais, para elementos estruturais ou não, em condições de produção que podem ser facilmente obtidas em praticamente qualquer parte do mundo. Talvez por isso o concreto tenha se

popularizado tão rapidamente em menos de 100 anos, num mundo onde as comunicações ocorriam, até então, de forma bastante mais lenta do que hoje.

A tecnologia do ferrocimento, por sua vez, embora possa ser considerada como a precursora do próprio concreto armado, permaneceu num estado de dormência durante este mesmo período. Conforme já dito, seu criador, o francês Joseph Louis Lambot, quando requereu a patente do material em 1856, buscava substituir a madeira na fabricação de embarcações e pequenas construções. No entanto, não era possível à época produzir em escala comercial os fios e as barras de ferro de pequeno diâmetro necessários às armaduras do ferrocimento (HANAI, 1992).

Gradualmente, a tecnologia do ferrocimento cedeu lugar à tecnologia do concreto armado, ainda que em essência os dois materiais façam parte da mesma família dos "concretos estruturais".

Foi ainda durante a II Guerra que Pier Luigi Nervi, engenheiro e projetista italiano, redescobriu a tecnologia do ferrocimento, retomando o seu desenvolvimento no sentido da pré-fabricação à base de elementos delgados, tecnologia cuja aplicação mostrou-se particularmente adequada no período de reconstrução da Europa no pós-guerra.

Denominando o *ferciment* de Lambot de *ferro-cemento*, Nervi foi o grande responsável pelo desenvolvimento e divulgação do material nesta nova fase, obtidos através das diversas aplicações arrojadas que projetou, tais como o Pavilhão de Exposições de Turim (1948), cuja cobertura cilíndrica com vão de 91,4m foi executada com elementos pré-fabricados de *ferro-cemento*, solidarizados entre si por arcos de concreto moldados no local (figuras 1.1 e 1.2).

Destacam-se ainda no trabalho de Nervi o Palacete de Esportes (1957), em Roma, uma cúpula esférica com 60m de diâmetro, e o Palácio de Esportes (1960), também em Roma, outra cúpula esférica com 100m de diâmetro, ambas as obras empregando elementos pré-fabricados de *ferro-cemento*.

Tais trabalhos projetaram o *ferro-cemento* internacionalmente, embora uma aceitação mais ampla do material tenha ocorrido de forma gradual nos demais

países. A demonstração da versatilidade da tecnologia, é a forma diferenciada como os países dela se apropriaram a partir do final da década de 50.



Figura 1.1 – Pavilhão de exposições de Turim (1948)

Nos países do Terceiro Mundo predominaram as aplicações artesanais, sob a forma de pequenas embarcações, reservatórios de pequena capacidade etc., produzidos manualmente com o auxílio de ferramentas rudimentares.

Nos países mais desenvolvidos, a leveza e as amplas possibilidades de pré-fabricação oferecidas pelo *ferro-cimento* de Nervi foram um forte atrativo para a sua produção em larga escala. Na antiga União Soviética, por exemplo, ocorreram avanços significativos no desenvolvimento de técnicas de produção seriada de componentes pré-fabricados e na elaboração de recomendações técnicas visando a disseminação da tecnologia do ferrocimento. Em 1980, a ex-União Soviética já contava com mais de dez milhões de metros quadrados de área coberta com elementos pré-fabricados de diversos tipos, além de um documento normalizador.

Já a partir do início dos anos 60, no entanto, o uso das estruturas laminares de concreto ou ferrocimento foram declinando no cenário europeu. A

elevação dos custos da mão-de-obra necessária para prover armaduras, escoramentos e fôrmas levaram os orçamentos a limites inaceitáveis frente a outras soluções competitivas mais simples, mais pesadas, mais baratas e igualmente funcionais.



Figura 1.2 – Pavilhão de exposições de Turim (1948)

Mas ainda assim, o ferrocimento seguiu sua trajetória internacional, e em 1976 foi criado o IFIC - International Ferrocement Information Center, com sede na Tailândia, organismo que desde então vem divulgando a tecnologia do material. Foram realizados até o momento sete simpósios internacionais sobre o material: na Itália (Bérgamo, 1981), na Tailândia (Bangkok, 1985), na Índia (Nova Delhi, 1988), em Cuba (Havana, 1991), na Inglaterra (Manchester, 1994), nos EUA (Michigan, 1998) e em Singapura (2000). Este sétimo e último “International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites”, realizado

em Singapura no ano 2000, traz uma curiosa, porém clara, indicação em seu próprio nome, quando menciona além da expressão “ferrocimento” um outro termo familiar a este trabalho os “elementos delgados de materiais compostos reforçados”. Este tema será abordado no capítulo final deste trabalho, quando se falará a respeito das perspectivas futuras da pré-fabricação leve.

Durante o IV Simpósio Internacional sobre Ferrocimento, celebrado em Cuba em outubro de 1991, foi criado oficialmente o CREDEF-Centro Regional para el Desarrollo del Ferrocemento en América Latina y el Caribe.

Nos EUA, o ACI-American Concrete Institute criou o Comitê nº 549 com o objetivo de estudar as propriedades mecânicas, práticas construtivas e aplicações do ferrocimento.

Algumas das principais características que podem explicar a aceitação internacional do ferrocimento são:

- A disponibilidade imediata de seus materiais constituintes na maioria dos países;
- A sua versatilidade construtiva, na medida em que pode ser fabricado segundo, praticamente, qualquer forma desejada e adaptado às tradições construtivas locais;
- As propriedades do ferrocimento podem ser alcançadas facilmente;
- Não são necessários equipamentos pesados, seja na produção seja na montagem;
- As construções de ferrocimento não exigem manutenção regular e a sua recuperação é simples;
- Trata-se de uma tecnologia apropriada para a produção em massa e a auto-construção.

A construção pré-fabricada de concreto, por outro lado, acabou consolidando-se como a forma mais viável e mais difundida para se promover a industrialização da construção, tomando um impulso sem precedentes no período do segundo pós-guerra. O "grande painel" de concreto foi o logotipo da reconstrução da Europa após a II Grande Guerra.

No entanto, acredita-se que seja muito restrita nos dias de hoje, uma definição de industrialização calcada nos modelos do pós-guerra, visto que tais modelos vêm passando por uma profunda revisão nos seus próprios países de origem, desde o final dos anos 80.

Por sua vez, o desenvolvimento de sistemas e componentes construtivos mais leves, buscando conferir um maior valor agregado ou “densidade tecnológica” aos produtos, parece ser uma tendência dominante para o futuro do segmento de pré-fabricados de concreto.

Neste sentido, o desenvolvimento de parâmetros para aplicação do concreto de alto desempenho neste segmento da construção civil, visando aumentar a diversificação dos produtos oferecidos para os mercados habitacional, industrial e comercial, pode representar um importante fator de ganho de competitividade para o setor. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland a participação do setor de pré-fabricados de concreto encontra-se estacionada em menos de 5% do consumo global de cimento no Brasil (SNIC, 1999).

Não obstante, o desenvolvimento de estruturas de elementos pré-fabricados delgados de concreto armado no cenário nacional, após o advento das grandes fábricas de sistemas e componentes construtivos empregando a argamassa armada nas décadas de 80 e 90, representa uma das experiências mais relevantes e reconhecidas no campo da industrialização da construção no país, quase única em termos internacionais.

A argamassa armada tornou-se conhecida por suas propriedades associadas às estruturas de elementos delgados, onde a tecnologia do concreto armado foi levada aos limites das estruturas metálicas ou de madeira. A pequena espessura —20mm em média— é a característica mais evidente de um componente pré-fabricado de argamassa armada, a qual lhe confere uma pequena massa. Por causa disso, o material é extremamente adequado aos sistemas construtivos pré-fabricados leves.

Nesse trabalho busca-se demonstrar inicialmente que a argamassa armada desenvolvida no Brasil ao longo de quase quatro décadas, é potencialmente um

microconcreto de alto desempenho, seja pelas suas propriedades de elevada resistência mecânica e durabilidade seja pela possibilidade econômica de sua aplicação, particularmente para a construção industrializada.

Sendo assim, ao se introduzir o tema proposto para a presente pesquisa, qual seja "Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: perspectivas de desenvolvimento para elementos pré-fabricados delgados" é importante ter em conta a mutabilidade do conhecimento comentada no início deste capítulo, também quando se trata da tecnologia da arquitetura.

Ou seja, embora as estruturas delgadas ou laminares de ferrocimento, de concreto armado, de argamassa armada ou de microconcreto armado venham sendo utilizadas na pré-fabricação leve e na industrialização há mais de 100 anos, claro está que este trabalho pretende aportar uma contribuição inovadora para o aperfeiçoamento de um material que chegou a um determinado limite além do qual necessita ter, comprovadamente, durabilidade, além de um elevado desempenho estrutural e viabilidade econômica.

Pretende-se que este material venha realmente representar uma alternativa tecnológica à construção industrializada e à pré-fabricação nos dias de hoje, as quais, por sua vez, já não são também as mesmas dos tempos de Nervi, do Pós-guerra ou as de 20 anos atrás.

O novo conhecimento em tecnologia da arquitetura que se pretende alcançar, para este autor, significa precisamente: o saber inteligível e transmissível resultante do desenvolvimento de um microconcreto de alto desempenho, capaz de conferir maior valor agregado e "densidade tecnológica" para os atuais sistemas e componentes construtivos pré-fabricados leves de concreto.

A RECENTE TRAJETÓRIA DA ARGAMASSA ARMADA NO BRASIL

A tecnologia à base de componentes pré-fabricados leves de argamassa armada vem sendo desenvolvida no Brasil desde o início da década de 60. Foi a partir das experiências pioneiras com o *ferro-cimento* do engenheiro de estruturas italiano Pier Luigi Nervi, que a Escola de Engenharia de São Carlos iniciou sua trajetória como maior centro de excelência nacional nesta tecnologia.

Empregados massivamente a partir da década de 80, inicialmente em obras de urbanização e saneamento para assentamentos precários ocupados por populações de baixa renda na cidade de Salvador, os componentes de argamassa armada foram utilizados posteriormente no Rio de Janeiro e em São Paulo, entre outras cidades, para responder aos mais variados programas.

No Brasil a primeira aplicação do argamassa armada foi feita em 1960, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, numa cobertura plana de 1.000m².

A partir das experiências relatadas por Nervi, e com a possibilidade de aplicação surgida de uma necessidade concreta, os professores Dante Martinelli, Frederico Schiel e, mais tarde, Lafael Petroni, foram os precursores no estudo do argamassa armada no País, dando origem ao chamado "Grupo de São Carlos" (HANAI, 1992).

Buscando adaptar o material às condições locais, foram realizados os primeiros ensaios com perfis pré-fabricados. Empregando taxas de armadura compreendidas entre 250kg/m³ e 300kg/m³ e um consumo de cimento de aproximadamente 700kg/m³, ao invés de taxas da ordem de 500kg/m³ e um consumo aproximado de 1000kg/m³ de Nervi, o Grupo de São Carlos empreendeu passos decisivos para a otimização da tecnologia e sua conseqüente consolidação (HANAI, 1992).

Portanto, já não se tratava da configuração do ferrocimento originalmente concebido por Nervi, embora os materiais constituintes fossem os mesmos, os conceitos estruturais fossem semelhantes e os comportamentos ligeiramente próximos. A argamassa armada desenvolvida pelo Grupo de São Carlos já não podia ser considerada, por conceito, o mesmo material que Nervi havia desenvolvido na década de 50. Enquanto o *ferro-cimento* era considerado um material composto, sinérgico, adotou-se classificar o argamassa armada, como um tipo especial de concreto armado, material associado.

Por outro lado, falar a respeito do estágio atual da argamassa armada para a pré-fabricação de componentes e elementos para sistemas construtivos industrializados, implica, necessariamente, num estudo da obra recente do arquiteto João Filgueiras Lima, hoje reconhecida internacionalmente.

Em busca de uma alternativa tecnológica para viabilizar projetos de urbanização de favelas em Salvador/BA, no ano de 1979, Lima, com a cooperação nos projetos estruturais de Frederico Schiel, professor da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, estabeleceu os primeiros parâmetros para industrialização da argamassa armada. Após este primeiro passo, o arquiteto assimilou o material e tornou-se o seu maior divulgador no Brasil, através da propriedade com que o vem aplicando em seus projetos.

João Filgueiras Lima desempenha no Brasil um papel similar àquele de Nervi na Itália dos anos 50. Sua criatividade como projetista e sua habilidade como gerente, inovaram e modificaram os conceitos de projeto e produção industrial, não somente no campo do microconcreto armado, mas também na Construção Civil como um todo.

O Brasil também dispõe desde 1989 da sua norma técnica para projeto e execução de argamassa armada, a NB1259, registrada no INMETRO como NBR-11173. O documento normativo, resultado do trabalho de técnicos que atuam no desenvolvimento e aplicação do material, correspondeu ao grau de maturidade em que se encontrava a argamassa armada naquela época e ressalta a importância e o destaque que o material conquistou no meio técnico nacional.

Foi no início dos anos 90, no entanto, que a argamassa armada ganhou dimensão nacional, na desastrosa iniciativa do governo de Fernando Collor ao implantar os CIAC's-Centros Integrados de Apoio à Criança em todo o território nacional. O ponto de partida dos CIAC's também foram os projetos do arquiteto João Filgueiras Lima. Os problemas contidos na origem do programa de obras proposto, tanto do ponto de vista logístico como tecnológico, por pouco não condenaram ao esquecimento um trabalho reconhecidamente sólido e conseqüente de técnicos e pesquisadores de vários centros de pesquisa e universidades brasileiras.

Para citar um dos aspectos questionáveis dos CIAC's em termos logísticos, basta falar que em 1991 cogitava-se que até o final daquele ano o Brasil teria 20 fábricas espalhadas pelo seu território, produzindo cada uma delas uma escola de 4.000 m² a cada quatro dias. Um dos insumos obrigatórios para a argamassa

armada, à época, era a tela soldada, cujas indústrias não possuíam àquela altura uma capacidade produtiva instalada para atender uma demanda de tal dimensão em tão pouco tempo.

Neste trabalho, no entanto, interessa conhecer e entender sobretudo os questionamentos de ordem tecnológica feitos à argamassa armada durante os anos 90. Será que tudo aquilo que se construiu sob a designação de argamassa armada seguiu um mesmo conjunto de critérios técnicos? Após a publicação da norma de "Projeto e execução de argamassa armada", todas as obras empregando a tecnologia passaram a seguir as mesmas prescrições? Como explicar as patologias surgidas em algumas obras desde então? Qual a origem destas patologias?

Frente às questões expostas e buscando contribuir para o seu esclarecimento científico, à luz do qual se espera que a pesquisa da tecnologia da argamassa armada readquira o vigor e o ritmo que vinha tendo até o início dos anos 90, foram propostos os seguintes objetivos práticos que orientaram as pesquisas que fornecem o embasamento empírico para o desenvolvimento deste trabalho:

- Realizar inspeções em obras executadas após 1980, visando melhor caracterizar a tecnologia nos dias de hoje e buscando estabelecer um referencial sobre a sua evolução recente no Brasil;
- Realizar estudos de dosagem para obtenção de uma matriz de microconcreto de alto desempenho, um sucedâneo da matriz da argamassa armada, numa analogia direta com o concreto de alto desempenho.

Cumprir esclarecer o porquê de se adotar a designação microconcreto, a qual também não é uma novidade, dentre as múltiplas expressões que designam os elementos delgados de concreto armado no Brasil, entre as quais se destacam argamassa armada, ferrocimento, e mesmo, microconcreto armado.

Tendo em vista estas múltiplas expressões, este pesquisador sente-se desde já na obrigação de buscar cunhar uma expressão única para designar a inovação a que o presente trabalho se propõe chegar, eliminando além disso uma

fonte freqüente de mal-entendidos em ciência e tecnologia: a existência de designações diversas para um mesmo conceito.

Sendo assim, adota-se a partir daqui a expressão única de "microconcreto" para se definir a matriz de alto desempenho aqui estudada. Atualmente, da mesma forma como vem ocorrendo com os concretos usuais, a matriz do microconcreto pode ter incorporados à sua composição aditivos, materiais cimentícios suplementares e os chamados pós reativos.

Os termos "microconcreto" e "de alto desempenho" justificam-se também pelo fato de não se utilizar agregados graúdos neste tipo de matriz e porque estão sendo obtidas em laboratório resistências à compressão simples que superam os 100 MPa. Esses resultados vêm sendo obtidos a partir da redução da porosidade da matriz, através do emprego de superplastificantes e sílica ativa.

O termo "microconcreto armado", por sua vez, define aqui a associação de uma matriz de cimento mais agregado miúdo, com armaduras difusas contínuas e/ou descontínuas constituídas por fios de pequeno diâmetro e pouco espaçados entre si, empregando uma gama de materiais tais como: barras de aço, telas soldadas de aço, telas de fibras sintéticas ou naturais, fibras descontínuas sintéticas ou naturais, cabos de aço (cordoalhas) etc.

A expressão "argamassa armada", doravante, será utilizada somente em sentido pretérito, quando se fizer referência à norma brasileira vigente de "Projeto e execução de argamassa armada" ou ao material empregado no passado para a execução de elementos delgados de concreto.

Faz-se necessário, portanto, estudar o microconcreto de alto desempenho em todos os seus aspectos, principalmente quanto à sua durabilidade, explorando ao máximo os avanços recentes ocorridos na família dos concretos, particularmente com relação ao concreto de alto desempenho.

CAP. 2 – ANTECEDENTES

A arquitetura moderna resulta da ocorrência de múltiplas circunstâncias relacionadas com o desenvolvimento progressivo da pesquisa científica e tecnológica, além da radicalização da investigação artística e do confronto de modelos de controle do desenvolvimento urbano (BENEVOLO, 1985).

Cada uma destas questões, a seu tempo, evoluiu separadamente no contexto cultural do início do século XX, interessando aqui particularmente o papel da pré-fabricação, seja como fundamento utópico do Modernismo, seja como ferramenta capaz de equacionar programas massivos de construção, a exemplo do ocorrido por ocasião da reconstrução da Europa no segundo pós-guerra.

É evidente o fato de que o grande painel pré-fabricado de concreto foi o logotipo da reconstrução da Europa destruída pela II Grande Guerra. No entanto, seria muito restrita nos dias de hoje uma definição de industrialização calcada nos modelos de pré-fabricação do pós-guerra, visto que tais modelos vêm passando já há algum tempo por uma profunda revisão em seus próprios países de origem (SALAS, 1981).

Neste trabalho, não se pretende abordar os diversos aspectos envolvidos na questão mais geral da industrialização da construção, mas tão somente identificar o desenvolvimento de um microconcreto de alto desempenho, com uma perspectiva promissora para as estruturas delgadas de concreto armado, buscando a sua possível aplicação na pré-fabricação leve.

Uma análise mais detalhada sobre a industrialização da construção e a evolução da pré-fabricação pode ser encontrada na dissertação de mestrado deste pesquisador, intitulada “Industrialização da construção e argamassa armada; perspectivas de desenvolvimento” (CAMPOS, 1989).

A PRÉ-FABRICAÇÃO NOS DIAS ATUAIS

É importante, inicialmente, definir o que vem a ser Industrialização da Construção, algo ainda complexo, tal a diversidade de conceitos emitidos por

especialistas no assunto. Visto que não há unanimidade sobre o tema, buscar-se-á aqui uma visão o mais concreta e pragmática possível, que aponte para uma classificação menos academicista.

A definição de industrialização a ser adotada neste trabalho, embora seja isso um fato freqüente, não pressupõe a via da pré-fabricação à base de elementos de concreto armado, como o único ou o melhor dos caminhos. A pré-fabricação, e por sua vez o pré-fabricado de concreto, são aqui considerados manifestações da Industrialização da Construção. A industrialização corresponde a uma noção muito mais vasta que a pré-fabricação, presente sobre a totalidade do processo de construção, desde a preparação para implantação da obra, até as últimas operações de acabamento.

Entretanto, é inegável a importância histórica dos pré-fabricados de concreto como o principal e mais conhecido meio para se alcançar a industrialização da construção.

De um modo geral, pode-se considerar a industrialização como o resultado de uma determinada interação de tecnologias, que se materializam ora no próprio processo de produção (tecnologia de processo) ora no produto (tecnologia de produto), ou ainda em ambos (SALAS, 1981).

Esses dois aspectos —tecnologia de processo e tecnologia do produto— definem uma linha possível de evolução, desde a construção convencional através de uma progressiva sofisticação de produto e/ou processo.

Neste sentido, entenda-se “industrialização” como uma tendência geral de desenvolvimento da própria indústria da construção, como ramo industrial. Construção e indústria são chamados a convergir.

A tendência de industrialização de ciclo aberto e a política de produção de componentes deram margem ao aparecimento, no final da década de 1980 e início dos anos 1990, daquilo que se convencionou chamar na Europa de a “segunda geração tecnológica” no campo da industrialização da construção (SALAS, 1981).

Os sistemas construtivos de ciclo aberto, ou seja, aqueles constituídos em suas partes fundamentais pelo emprego de elementos pré-fabricados de várias procedências, passaram a ser a marca desta segunda geração. Segundo Salas, costumam ser características definidoras dos sistemas abertos de pré-fabricação:

- a coordenação dimensional que possibilite unir o maior número de elementos e produtos de distintas procedências;
- o catálogo de elementos padronizados, que possibilita ao usuário uma informação exhaustiva sobre o produto, de modo a facilitar o seu emprego;
- o raio de ação tanto maior quanto mais específicos sejam os elementos pré-fabricados;
- a flexibilidade dos processos de produção, de modo a atender encomendas de produtos especiais, tirando de linha produtos que se tornaram obsoletos, combatendo a tendência de fechamento paulatino do processo, etc.;
- a montagem dos componentes pré-fabricados por terceiros, já que os fabricantes não costumam se responsabilizar por outra coisa que não o bom comportamento de seus produtos;
- a possibilidade de manter elementos de catálogo em estoque, especialmente se ocupam pouco volume.

Desde os anos 1980 processa-se entre os países da Comunidade Econômica Européia, para citar o exemplo mais conhecido, uma espécie de industrialização sutil. Uma industrialização que muitas vezes prescinde de grandes guias, mas que leva à obra produtos pré-fabricados com um maior valor agregado do que se levava antes, na forma de componentes com um alto grau de acabamento. Alguns destes componentes passaram a ser oferecidos no mercado brasileiro há alguns anos atrás, como é o caso dos banheiros prontos (figuras 2.1 e 2.2).



Figura 2.1 – Vista interior de banheiro pronto pré-fabricado em usina

No caso brasileiro, constata-se, independentemente da chegada destes novos produtos através da instalação no país de empresas estrangeiras, a existência de um imenso parque produtor já instalado na área de pré-fabricação, parque este que já é fornecedor habitual de componentes para a construção de edifícios industriais, comerciais e habitacionais. É diante desta realidade que se coloca a presente pesquisa, explorando as possibilidades para o aperfeiçoamento e o desenvolvimento de novos produtos, com base na capacidade real instalada.

Uma visão prospectiva daquilo que poderia ser um "mercado aberto de componentes" na realidade da construção civil brasileira, por sua vez, conduz à questão do projeto e da atividade de desenvolvimento de produto, o que

ultrapassa o simples "somar produtos de diferentes procedências". Além da retaguarda normativa, sobre a qual obrigatoriamente deve apoiar-se a industrialização de ciclo aberto, também pressupõe-se aquilo que se chama de projeto aberto.



Figura 2.2 – Linhas de produção de banheiros prontos pré-fabricados em usina

Tradicionalmente, entende-se como elementos industrializados, desde as peças mais simples até os diferentes painéis, lajes de piso, etc. A derivação qualitativa do conceito de elemento até o de componente, sugere a individualização das partes de uma edificação em sub-sistemas (cobertura, vedação, fundações etc.) a partir do aparecimento do conceito de normativa exigencial (SALAS, 1981).

Os sub-sistemas, constituídos como agrupamento de elementos, tendem a ser unidades auto-suficientes de desenvolvimento e agregação, unidades funcionalmente unitárias e independentes entre si, com respeito à função e possibilidades de desenvolvimento.

Dentro desta visão, o componente seria o resultado da decomposição do organismo arquitetônico em unidades auto-suficientes ou unidades de projeto.

Dotados de uma capacidade de articulação lingüística própria, os componentes representam a consubstanciação do tradicional módulo-medida em módulo-objeto (SALAS, 1981).

O significado da palavra “sistema” —conjunto de elementos entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação, disposição das partes ou dos elementos de um todo, coordenados entre si e que funcionam como estrutura organizada— tende a justificar uma visão restrita do que vem a ser um sistema, associada às patentes clássicas de sistemas fechados.

As características próprias daqueles sistemas supõem regras de jogo internas, derivadas dos elementos resistentes e dos elementos de união próprios, que permitem uma certa combinação e o desenvolvimento de diferentes linguagens respeitando estas leis.

Na realidade, mesmo dentro de suas normas, os sistemas fechados não possuem possibilidades combinatórias ilimitadas. Ao contrário, em geral, estão sujeitos à incorporação de elementos externos, no que contradizem o sistema fechado no seu sentido mais estrito (CAMPOS, 1989).

Da mesma forma, com os sistemas abertos ocorre algo semelhante. Mesmo quando seu âmbito de aplicação e suas possibilidades combinatórias são mais amplas, a prática demonstra que tampouco sua estrutura interna é tão flexível como caberia supor. O sistema universal, autêntica pedra filosofal da industrialização, é uma falácia (CAMPOS, 1989).

No presente trabalho, uma possível discussão sobre forma que deve assumir a industrialização no Brasil, se fechada ou aberta, passa ao largo. O escopo é mais restrito, limitando-se a pesquisa às possibilidades de serem fornecidos subsídios técnicos ao desenvolvimento de novos produtos para a pré-fabricação leve, com base na significativa capacidade real já instalada. Os elementos pré-fabricados devem adaptar-se aos meios de produção disponíveis nos médios e grandes centros urbanos, favorecer a produção de edificações evolutivas e adaptar-se às características regionais permitindo a eventual incorporação de elementos produzidos localmente.

A Industrialização da Construção pode assim ser finalmente definida como a produção do bem construção, como processo de projeção, produção e uso, isto é, como seqüência de momentos operativos, organizativos e gestonais, coerentes e coordenados visando a otimização dos resultados a serem obtidos com determinados recursos e condições contextuais (MAGGI citado por VIANNA, 1987).

TECNOLOGIAS “LOW-TECH” PARA VENCER OS DESAFIOS DA ESCASSEZ

O texto do Plano Nacional de Pesquisa Científica, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica (2000-2003) implementado pela CICYT-Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología da Espanha, defende o fortalecimento da pesquisa, do desenvolvimento e da inovação tecnológica como ponto de partida para o crescimento, o emprego, a qualidade de vida e, definitivamente, o futuro da sociedade daquele país (CICYT, 2000). O mesmo texto indica entre as áreas científico-tecnológicas prioritárias, materiais e projeto/produção industrial.

Com certeza o modelo proposto por aquele plano não teria um significado equivalente frente às realidades e desafios que hoje se colocam para países como o Brasil, mas ainda assim algumas lições importantes podem ser tiradas dali, particularmente no que se refere à convicção no importante papel da pesquisa, do desenvolvimento e da inovação tecnológica para o bem-estar social.

Os aparelhos de estado nos países da América Latina em geral, após ocuparem por mais de um século o papel de grandes provedores de infraestrutura e demais condições necessárias ao modelo de desenvolvimento capitalista imposto aos países do Terceiro Mundo, experimentam atualmente —na maior parte dos casos— um quadro de esgotamento fiscal que reforça cada vez mais o seu caráter dependente e reparador na gestão das estruturas físicas urbanas das cidades do continente (CAMPOS, 1998).

Durante o período de reconstrução democrática, comum a vários países da região, novos atores políticos e sociais surgiram e se consolidaram como interlocutores do estado e representantes da sociedade. Os movimentos sociais,

em especial os urbanos, como o sindical e os de moradia, passaram a exigir o apoio das autoridades locais para suas lutas.

Desde então, em contraposição ao centralismo autoritário, o poder local —uma instância do estado com abrangência sobre as cidades— vem assumindo um expressivo papel político e econômico, tornando visível um contraponto às tendências neoliberais que defendem o “estado mínimo” e uma descentralização irresponsável das atribuições antes pertencentes aos governos centrais.

A proximidade entre a gestão local e os problemas da comunidade, mesmo nas grandes metrópoles latino-americanas, significa uma possibilidade real de rearticulação da população com a vida do seu país e de combate à miséria urbana, principal desdobramento da globalização da economia nas cidades.

O grande desafio que se impõe para arquitetos e urbanistas, portanto, segue sendo a integração da cidade ilegal ao tecido urbanizado da cidade formal, o qual pressupõe, por certo, um novo modelo de desenvolvimento urbano, mas que, por sua vez, também corresponde a um modelo tecnológico inovador para a habitação social e para as obras de intervenção urbana, mais próximos das necessidades da população.

Os padrões admissíveis a serem fixados nas normativas aplicáveis a novas tecnologias apropriadas e apropriáveis, a princípio, podem e devem ter um caráter tão inovador e flexível quanto aquele dos produtos que vão regulamentar. Ou seja, a rigidez das normas, caso isso signifique seguir modelos convencionais e conservadores, em nada contribui para a invenção, seja na arquitetura seja no urbanismo, e tampouco dá a certeza de soluções adequadas tecnologicamente aos programas propostos.

Algumas das ações de melhoramento e reordenamento tomadas como exemplos de “boas práticas” na Conferência HÁbitat II em Istambul, ocorreram recentemente em assentamentos urbanos precários de cidades latino-americanas, empregando soluções econômicas e com uso intensivo de tecnologia (CAMPOS, 1999).



Figura 2.3 - Edifício habitacional construído com técnica de pré-fabricação mista aço-concreto no assentamento precário Catuche (Caracas, 1997)

A tecnologia da habitação nestes casos, evidencia-se através do uso de técnicas de pré-fabricação leve, novos materiais, produtos e processos construtivos, desenvolvidos especificamente para este tipo de intervenção, onde podem ser identificados, até mesmo, vários componentes do repertório conhecido mundialmente como “high-tech” (figura 2.3). Ou seja, à precariedade dos assentamentos urbanos onde se pretenda intervir, não correspondem tecnologias precárias para atendimento das demandas.

A busca de um modelo tecnológico, aqui chamado de “low-tech”, pode ser definida como a procura de um novo paradigma, em contraposição ao termo “high-tech” inventado por P. Buchanan em 1983, para designar uma corrente da arquitetura inglesa, a qual está associada também a nomes como Renzo Piano, Buckminster Fuller, Jean Prouvé e Frei Otto, entre outros (BENEVOLO, 1985).

Segundo Benevolo, pode-se dizer que a procura de “tecnologias apropriadas” é uma oportunidade para se reavaliar os métodos construtivos e, até

mesmo, os modelos de distribuição de produtos e transferência tecnológica, superados desde a industrialização convencional, a qual por sua vez também já faz parte do passado.

O eminente professor da Universidade de Berkeley, P. Kumar Mehta, indiano radicado nos EUA e uma das maiores autoridades mundiais em tecnologia do concreto, afirmou há alguns anos atrás que em muitos países são adotadas novas e caras tecnologias, porque são “high-tech”, ou seja, representam o mais moderno (MEHTA, 1996). Diz ainda que “é muito tentador o apelo “high-tech”, comentando em tom irônico a importação indiscriminada de modismos forâneos por países pobres.

Mehta questiona ademais, a falta de orientação nas universidades e nos meios de comunicação especializados, sobre o estudo e difusão das alternativas mais econômicas, eficazes e adequadas aos países com menos recursos.

Sendo assim, o objetivo de desenvolver neste trabalho um microconcreto de alto desempenho justifica-se principalmente como uma resposta às necessidades sociais de se viabilizar sistemas e componentes construtivos mais leves, buscando conferir um maior valor agregado ou densidade tecnológica a produtos associados às estruturas de elementos delgados.

As pesquisas e inovações tecnológicas no campo da habitação social seguem sendo desenvolvidas e aplicadas, ainda que num ritmo muito aquém do que poderia supor a “fome de habitação” a que se refere Salas (SALAS, 1992), a qual persiste na América Latina.

São ainda as universidades e os institutos de pesquisa os responsáveis por boa parte do conhecimento recentemente produzido, mas há que se considerar também as contribuições de organizações não governamentais, de redes internacionais de cooperação e até mesmo de algumas empresas privadas locais, dispostas a investir seu tempo e seus recursos no estudo e implantação de soluções, não somente para as habitações necessárias, mas para as cidades e para o hábitat.



Figura 2.4 - Linhas de produção de componentes pré-fabricados leves para canalização de córregos em assentamentos precários – Centro de Desenvolvimento de Equipamentos Urbanos e Comunitários-CEDEC/EMURB (São Paulo, 1990)

É de se esperar que, além de ter assegurados os direitos de acesso ao solo urbano, ao saneamento básico e aos demais serviços, a população menos favorecida possa contar com produtos especificamente desenvolvidos para as suas necessidades de consumo (figura 2.4).

DO ARQUITETO-AUTOR AO ARQUITETO-ATOR

O subtítulo que designa esta penúltima parte deste capítulo foi emprestado do título homônimo do artigo escrito por Jorge Di Paula (DI PAULA, 2000), e ainda que os conteúdos aqui abordados não sejam exatamente os mesmos tratados por aquele texto, a idéia que se quer reforçar é basicamente a mesma: o arquiteto já não é um criador isolado, mas um “planejador integrado, que associado a grupos de competências diversas, cria configurações capazes de dilatar-se no tempo” (CIRIBINI citado por VIANNA, 1987).

Segundo o professor de história da filosofia, Paolo Rossi, a superioridade do pensamento moderno, fundamentada nas conquistas da ciência e da técnica ocorridas a partir do século XVI, reside no caráter progressivo do conhecimento (ROSSI, 1989). O mesmo autor diz ainda que “o saber ‘transmissível’ (e, portanto, sempre reutilizável e suscetível de aperfeiçoamento) é superior a todas as formas de sabedoria espiritual solitária” (ROSSI, 1989). Ou seja, a produção do conhecimento é uma atividade essencialmente cooperativa.

Num outro interessante e polêmico texto, cujo título é “A arquitetura consumida na fogueira das vaidades”, veiculado recentemente no periódico mensal “Arquitextos” através do sítio da internet “Vitruvius.com.br”, o arquiteto e professor Edson Mahfuz, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, afirma que o período pós-Brasília da arquitetura moderna brasileira caracteriza-se pela “crescente predominância da construção comercial, dominada pelas razões do mercado e pela obsessão generalizada com a criação de imagens” (MAHFUZ, 2001).

Pode-se acrescentar ao ponto de vista de Mahfuz o fato do processo de pesquisa e de inovação tecnológica, como fundamento do movimento moderno e base conceitual da “invenção em arquitetura”, ter sido deliberadamente jogado de lado pela arquitetura de mercado, com sua estética de “shopping center” trazida para fora e convertida em cenários urbanos que mais lembram a triste realidade virtual da Las Vegas de “One from the heart” (figura 2.5) criada por Francis Ford Coppolla dentro da Zoetrope Studios (COPPOLLA, 1982).

A decadência da arquitetura como profissão socialmente relevante também é abordada no artigo de Mahfuz, ao recordar que “pelo menos até o final do regime militar no Brasil, a arquitetura era vista como uma profissão com um papel social definido, e aqueles que nela ingressavam tinham a esperança de contribuir para a elevação da qualidade de vida do maior número de pessoas. Hoje, a máxima aspiração de grande parte dos jovens arquitetos é participar de eventos como Casa Cor e similares”.



Figura 2.5 - Cartaz do filme “One from the heart” (1982) de Francis Ford Coppolla, em sua versão francesa

A arquitetura encarada atualmente como puro objeto de consumo, está vinculada à comunicação de massa e ao entretenimento, seguindo uma lógica de mercado à qual todos os aspectos da vida humana devem estar subordinados, na ótica dos fundamentalistas que professam esta fé.

Segundo esta ótica, o arquiteto-autor e sua obra não têm qualquer outro compromisso social e cultural, a não ser com a sua própria expressão pessoal, talvez sob a influência de fatores metafísicos como aqueles que levavam magos, naturalistas ou alquimistas do século XVI a preconizar a solidão, o sigilo e a intransmissibilidade do seu conhecimento (ROSSI, 1989). Daí a lembrança deste pesquisador, lembrando a professora e historiadora Sophia Telles, ao indagar

em suas aulas de História da Arte na FAU da PUC-Campinas, mais ou menos o seguinte: — Mas afinal, arquitetura é conhecimento (FAU-PUCC, 1979)?!

Segundo Mahfuz, citando a Carlos Martí Arís, "os verdadeiros objetivos da obra de arquitetura não tratam de utilizá-la como expressão de emoções ou veículo de fantasias, mas fazem que ela seja capaz de revelar dimensões ou aspectos da realidade que interessam a todos" (MARTÍ A. citado por MAHFUZ, 2001).

Porém há outras arquiteturas “muito além dos Jardins”, que se movem por ambientes menos elegantes do que as avenidas cercadas pelos cenários neoclássicos das “cidades temáticas” organizadas à luz da economia de mercado, as quais, em que pese a ágil informação globalizada, não são divulgadas.

Salas pergunta: “Como se alojam os 3 bilhões de novos habitantes acrescentados à população mundial entre 1970 e o ano 2000? Como vivem?” Pouco se sabe e, ao que parece, este não é um tema prioritário para uma profissão que muitas vezes reivindica para si a exclusividade sobre o ato de construir.

Sim, sabe-se onde estão os 80% destes novos habitantes —2,4 bilhões— que incrementaram as populações dos países do Terceiro Mundo. Para eles os “arquitetos sem aplausos”, uma plêiade de excelentes profissionais latino-americanos que, sim, se preocupam com a “fome de habitação” de que padecem milhões de seus compatriotas (SALAS, 2001).

As soluções destes arquitetos, nas palavras de Salas, apontam para a magistral utilização da argamassa armada de que faz uso o arquiteto Lelé, na implantação de melhorias urbanas em favelas no Brasil; a sintonia entre função-forma-materiais das realizações a que chegou o engenheiro uruguaio Dieste; os generosos resultados formais obtidos com recursos escassos em condomínios projetados pelo chileno F. Castillo; a equilibrada dosagem processo/produto das realizações do CEVE-Centro Experimental de la Vivienda Económica da Argentina; a prática vigente do adobe nas construções do peruano J. Vargas; a dignidade das habitações em encostas utilizando o bambu feitas pelo mestre colombiano O. Hidalgo; o salto conceitual dado na prática pelo mexicano C. González construindo habitações onde primam os metros cúbicos: `volume

máximo, custo mínimo’; as técnicas de industrialização ‘possível’ postas no mercado venezuelano pelo engenheiro J. A. Peña (SALAS, 2001).

A exemplo destes e de outros “arquitetos sem aplausos”, este pesquisador faz sua a reflexão de Albert Camus transcrita por Salas: “... já não estaremos nunca sós. Devemos saber, pelo contrário, que não podemos nos evadir da miséria comum, e que nossa única justificativa —se é que temos alguma— é falar, na medida de nossas possibilidades, pelos que não podem fazê-lo”.

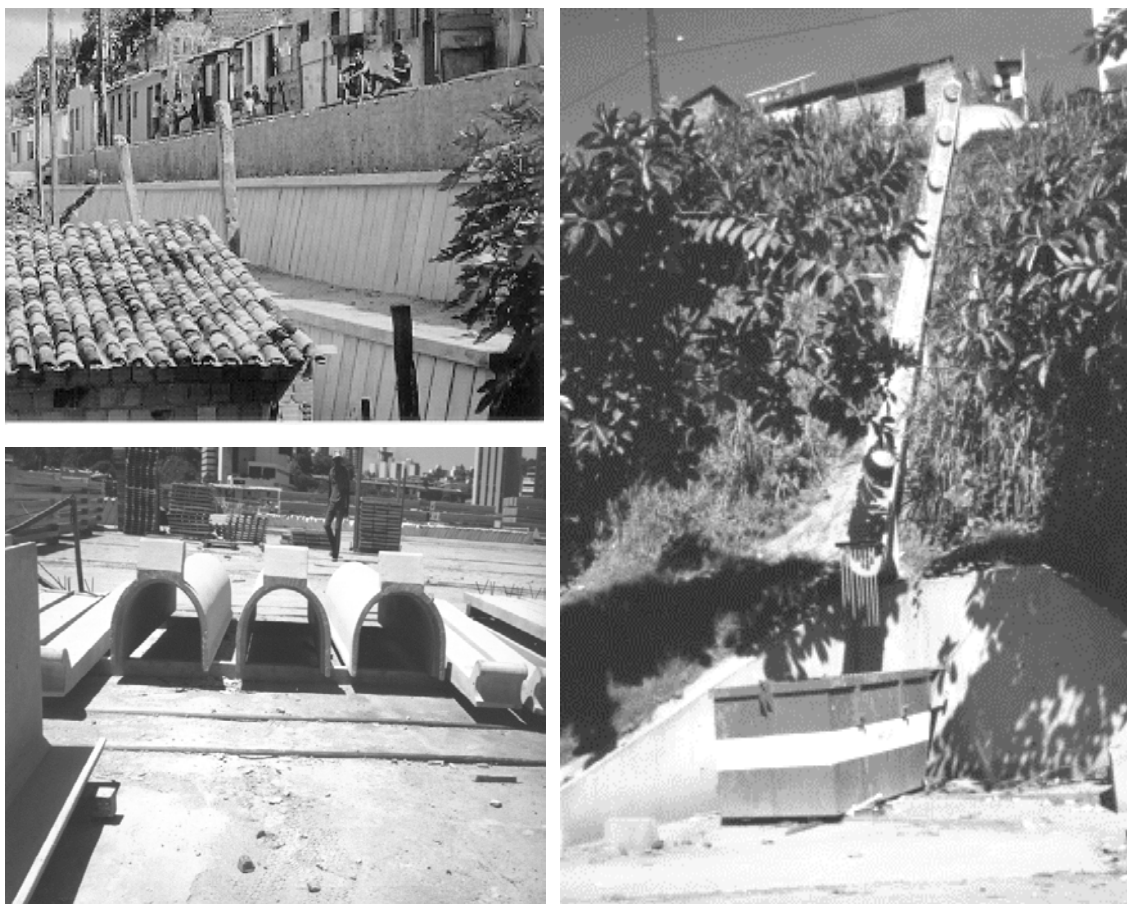
Atuar como conseqüência do pensar, esta é a maior justificativa deste pesquisador e arquiteto-ator, que espera contribuir com este trabalho, no limite de suas possibilidades, para o desenvolvimento de conhecimento apropriado e apropriável que venha a se converter em respostas concretas para a superação das carências sociais por espaço edificado que seguem existindo no país.

A APLICAÇÃO DOS NOVOS CONHECIMENTOS

A aplicação do microconcreto de alto desempenho visando aumentar a diversificação dos produtos oferecidos para os mercados habitacional, industrial e comercial, pode representar um importante fator de ganho de competitividade para este segmento da indústria da construção.

O estudo aprofundado do microconcreto de alto desempenho de que trata esta pesquisa, justifica-se pelas propriedades potenciais que o material oferece para aplicação no campo associado às estruturas de elementos delgados.

A tecnologia à base de componentes pré-fabricados leves de argamassa armada desenvolvida no Brasil desde o início da década de 1960, a partir das experiências pioneiras da EESC-Escola de Engenharia de São Carlos da USP, foi adequada à realidade brasileira e lançada como um tipo especial de concreto armado, o qual viabilizou, entre outros projetos, obras de urbanização de favelas em Salvador-BA em 1980, quando o Arq. João Figueiras Lima, com a cooperação nos projetos estruturais do professor da EESC-USP, Frederico Schiel, estabeleceu os primeiros parâmetros para industrialização do material.



Figuras 2.6 - Muros de contenção (1980) e “lixodutos” (1987) implantados em Salvador-BA

Neste trabalho, conforme já dito em capítulos anteriores, interessa conhecer e entender sobretudo os questionamentos de ordem tecnológica feitos à argamassa armada durante os anos 1990, buscando contribuir para o seu esclarecimento científico.

A utilização da tecnologia de pré-fabricação da argamassa armada consolidou-se no passado, sobretudo, na forma de:

- obras de urbanização e saneamento básico, executadas em assentamentos populacionais precários (figuras 2.6);
- construções de edificações para uso social, como escolas e edifícios públicos (figura 2.7);

- equipamentos e mobiliário urbano, como abrigos de ônibus, passarelas para pedestres e sanitários públicos.



Figura 2.7 - Sede do TCU-Tribunal de Contas da União em Salvador-BA (1955), executado com a utilização de um sistema construtivo misto aço-argamassa armada

No entanto, vislumbra-se uma série de outros usos no campo das técnicas industrializadas leves. O uso de componentes de microconcreto de alto desempenho para habitação, por exemplo, representa uma possibilidade concreta para vencer parte da enorme carência de 7 milhões de unidades, existente no Brasil atualmente (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 1995).

Com o advento do microconcreto de alto desempenho, denominação proposta para uma nova geração de matrizes de argamassa armada, numa analogia direta com o concreto de alto desempenho, acredita-se ser possível restabelecer paradigmas a respeito das estruturas delgadas de concreto armado e, sobretudo, quebrar uma falsa imagem negativa que se formou à volta do

passado recente de algumas obras associadas à tecnologia, cujo efeito foi arrefecer momentaneamente as perspectivas para o seu desenvolvimento.

As contribuições contidas neste trabalho para o esclarecimento destas questões, bem como os parâmetros aqui definidos para obtenção do microconcreto de alto desempenho, justificam-se por si sós, na medida em que venham a incentivar a retomada das pesquisas tecnológicas sobre estruturas delgadas de concreto armado, almejando que as mesmas possam readquirir o vigor e o ritmo que vinham tendo até o início dos anos 1990.

CAP. 3 - COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Na história da construção, onde são poucas as inflexões marcadamente ascendentes no sentido da evolução, pode-se destacar determinados eventos tais como a invenção do arco, o descobrimento do cimento pelos romanos e o seu emprego na construção de grandes abóbadas de concreto, ou ainda o emprego do ferro como material de construção.

Parafraseando Julián Salas, pode-se aqui afirmar que no caminho da industrialização da construção não há motivos para ser otimista. Atualmente, os avanços que acontecem na microeletrônica em 20 meses ou na medicina a cada 2 anos, tardam 20 anos para ocorrer na indústria da construção civil.

Arquivo José Antonio Torroja

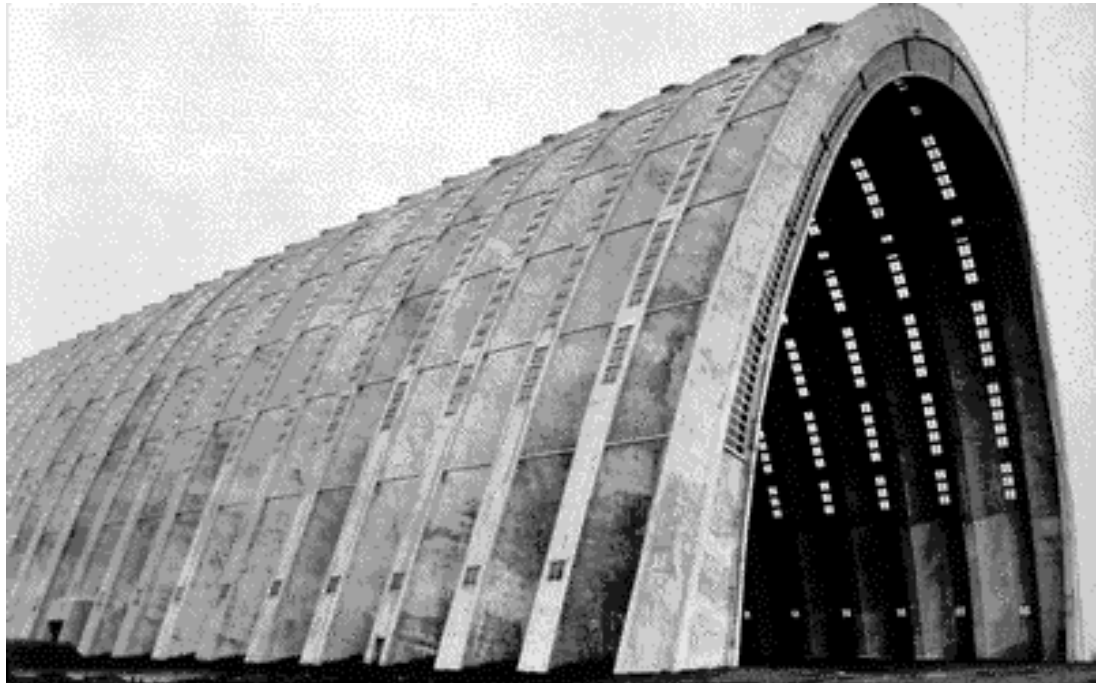


Figura 3.1 - Hangares de Orly (1921) projetados por Eugene Freyssinet (1879-1962), cada um deles constituído por módulos com uma lâmina de 9 cm de espessura, para um vão de 88 m

As grandes inovações do recente século XX, sob uma perspectiva de avanços qualitativos, são com certeza a invenção da protensão por Freyssinet e o desenvolvimento das estruturas laminares de concreto armado, para o qual contribuíram decisivamente nomes como Pier Luigi Nervi e Eduardo Torroja, na Europa, ou Félix Candela, espanhol radicado na América Latina.



Arquivo José Antonio Torroja

Figura 3.2 - Frontón Recoletos (1935) projetado por Eduardo Torroja (1899-1961) e destruído durante a Guerra Civil espanhola, onde a cobertura é constituída por duas cascas cilíndricas de 8 cm de espessura, com raios de 12,20 m e 6,40 m, que se entrecortam ortogonalmente, conformando um vão total de 33,00 m

No início do século XX, sob a influência dos princípios do funcionalismo e das tipologias construtivas decorrentes do uso dos novos materiais na segunda metade do século XIX, uma nova mentalidade surgiu de forma tênue por volta dos anos 30.

A característica principal desta tendência, é a busca quase obsessiva pela leveza, uma paixão pelo risco até os limites do possível e “um profundo e novo sentimento de qualidade estrutural” (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999).

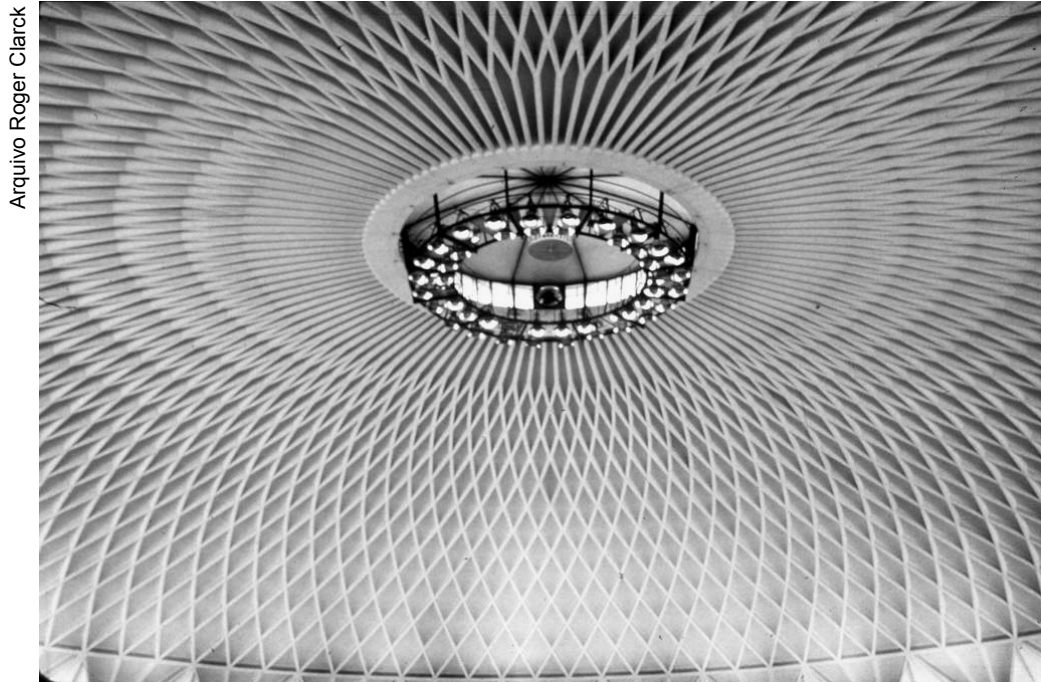


Figura 3.3 - Palacete de Esportes de Roma (1957) projetado por Nervi (1891-1972), cuja cúpula esférica da cobertura, com 60 m de diâmetro, foi executada com elementos pré-fabricados de *ferro-cemento* de apenas 25 mm de espessura

Nas palavras de Fernández Ordóñez e Navarro Vera, este período pode ser entendido como um parêntesis utópico que introduz o poético frente à dureza do estritamente funcional e à brutalidade do econômico, mas não de um modo gratuito, senão que partindo da verdade essencial dos materiais do nosso tempo e transformando dos pés à cabeça as tipologias estruturais tanto nas coberturas como nas represas.

As estruturas laminares, neste contexto, conformam uma das expressões mais autênticas das vantagens a que pode se chegar com o concreto armado, explorando

suas características de moldabilidade, monolitismo, leveza e resistência pela forma. É Torroja quem afirma: “nenhum material podia dar origem, com tanta liberdade e eficácia, a formas variadas e resistentes, com espessuras mínimas e levezas utópicas, até poucas décadas” (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V. , 1999).

ALGUMAS PREMISSAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DELGADOS DE ÚLTIMA GERAÇÃO

Não foi por acaso que a protensão de Freyssinet e as estruturas laminares de Torroja foram invenções concebidas nos anos 30 do século passado, em meio a um processo comum de “melhora da qualidade do concreto, de substituição da quantidade pela qualidade”. Esta foi uma revolução única em toda a história da construção, a qual por certo também pode ser associada à pré-fabricação massiva que iria ser desencadeada 20 anos depois na Europa, no período de reconstrução que se seguiu ao término da Segunda Guerra Mundial (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999).

Atualmente, o desenvolvimento do concreto de alto desempenho também vem permitindo a execução de estruturas cada vez mais esbeltas, lajes menos espessas e pilares delgados, além de proporcionar expressões plásticas mais interessantes que as permitidas pelos concretos usuais.

Há 20 anos atrás, quando os arranha-céus irrompiam dentro da paisagem urbana das grandes cidades americanas, as estruturas metálicas passaram a ser uma tipologia construtiva fundamental para se atingir as extraordinárias alturas pretendidas. A resposta da tecnologia do concreto armado ocorreu ao longo da década de 1980, quando o material evoluiu notavelmente no sentido de uma maior resistência mecânica. Valores entre 60 e 80 MPa são atualmente relativamente fáceis de serem obtidos, e com uma dosagem ainda mais elaborada, empregando-se as adições de sílica ativa, pode-se alcançar valores superiores aos 80 e 100 MPa.

Como resultado deste notável desenvolvimento, não só diminuiu a quantidade de edifícios construídos com estruturas metálicas, como aumentou a dos executados

com estrutura de concreto, chegando-se inclusive a uma reversão no quadro (AÏTCIN, 1998).

Muito além dos arranha-céus, porém, o concreto de alto desempenho, não só por sua alta resistência como pelas suas reconhecidas condições de oferecer uma maior durabilidade, acaba por reafirmar e revalidar as premissas propostas por Torroja para o desenvolvimento das estruturas laminares, onde a melhora da qualidade do concreto representa a possibilidade efetiva de aplicação do conceito de “substituição da quantidade pela qualidade”.

Do ponto de vista estrutural, as lâminas podem ser definidas como elementos estruturais em que duas dimensões predominam em relação a uma terceira. Podem ser placas, cascas, membranas ou outros elementos estruturais delgados, cuja pequena espessura acaba por exigir uma maior complexidade na forma quando se busca a resistência.

Ao caracterizar um componente pré-fabricado de microconcreto armado em função da sua pequena espessura (20mm em média), o que lhe confere uma menor massa, fica estabelecida uma condição essencial para o emprego desta tecnologia: o uso indispensável do concreto de alto desempenho.

O termo "microconcreto armado", conforme afirmado, define aqui a associação de uma matriz de cimento mais agregado miúdo, com armaduras difusas contínuas e/ou descontínuas constituídas por fios de pequeno diâmetro e pouco espaçados entre si, empregando uma gama de materiais tais como: barras de aço, telas soldadas de aço, telas de fibras sintéticas ou naturais, fibras descontínuas sintéticas ou naturais, cabos de aço (cordoalhas) etc.

Ainda que as armaduras sejam constituídas ou estejam protegidas por materiais resistentes à corrosão, a qualidade da matriz cimentícia é essencial para impedir que processos deletérios venham a comprometer a durabilidade ou mesmo o aspecto dos elementos delgados de microconcreto armado.

O ESTAGIO ATUAL DA PRÉ-FABRICAÇÃO LEVE

Embora a argamassa armada tenha conquistado notoriedade nacional e internacional em função do seu elevado desempenho estrutural, o que permitiu a sua aplicação desde obras monumentais até componentes pré-fabricados para habitação, aparentemente não há dados suficientemente consistentes capazes de demonstrar a durabilidade e a competitividade econômica da tecnologia.

Pode-se dizer que, no Brasil, muitas das duras críticas dirigidas à tecnologia da argamassa armada, particularmente no início da década de 90, não por acaso logo após o lançamento do programa do governo federal para a construção dos denominados CIACs-Centros Integrados de Apoio à Criança, caracterizam-se também por sua falta de consistência e de base científica, na medida em que não se tem notícia de trabalhos acadêmicos mais relevantes que tenham sido produzidos recentemente a respeito do assunto.

Ademais, a sucessão de boatos que ocorreu após o lançamento do Programa dos CIACs pode ser vista ainda sob outros ângulos, estritamente comerciais, os quais por vezes originaram comentários furtivos em corredores de prédios universitários e institutos de pesquisas, mas que infelizmente não se converteram em teses ou artigos científicos.

Não obstante, o estágio atual da tecnologia da argamassa armada no cenário nacional após o advento das fábricas de sistemas e componentes construtivos pré-fabricados empregando este material, implantadas ao longo da década de 80 e início da década de 90, permitiria qualificá-la como extremamente adequada à pré-fabricação leve e à construção industrializada. A argamassa armada, como material "stricto sensu", apresenta em suas propriedades potenciais um campo de aplicação associado às "estruturas de elementos, não só relativamente, como absolutamente delgados, onde a tecnologia do concreto armado é estendida quase que aos limites das estruturas metálicas ou de madeira" (HANAI, 1981).

A partir da observação de suas propriedades enquanto membro da família dos concretos estruturais, a argamassa armada desenvolvida no Brasil ao longo de

quatro décadas, diferentemente da tecnologia assimilada e desenvolvida simultaneamente em outros países, é potencialmente um microconcreto armado de alto desempenho, seja pelas características de desempenho estrutural que podem ser alcançadas seja pela possibilidade econômica de sua aplicação, particularmente para a construção industrializada.

Apesar de tudo isso, acompanhando uma tendência internacional, como explicam Hanai e El Debs, há fortes e objetivas restrições, particularmente no que se refere a durabilidade e custos, que vêm impedindo o desenvolvimento da argamassa armada (HANAI e EL DEBS, 1994).

Uma análise da bibliografia internacional produzida na década de 80 e início dos anos 90 identifica as tendências da pesquisa sobre a tecnologia da argamassa armada (HANAI e EL DEBS, 1994). Divididos em 4 áreas, os trabalhos foram classificados segundo as seguintes ênfases:

- a) Geral - abordagens genéricas sobre o tema;
- b) Material - estrutura interna e propriedades, durabilidade, etc.;
- c) Desempenho Estrutural - sistemas estruturais, elementos estruturais, propriedades, etc.;
- d) Aplicação - desenvolvimento de sistemas e componentes construtivos, aplicações em geral, etc.

O quadro a seguir apresenta as referências bibliográficas distribuídas segundo esta classificação e as fontes consultadas, a saber:

1. Dialog-Compedex Data Base - período 1985/92
2. NTIS - National Technique Information Service - US, período 1980/89
3. Melvyl Catalog Data-Base - University of California at Berkeley - US
4. Produção técnica e científica do Grupo de São Carlos - EESC/USP - 1982/92
(Teses e dissertações, trabalhos, relatórios)
5. Outras fontes

Tabela 3.1 - Classificação dos trabalhos analisados

Objetivo principal presumido	Dialog-Compedex		NTIS/outros		São Carlos	
	# Refs	%	# Refs	%	# Refs	%
Aplicação	96	45.6	21	61.8	22	31.4
Desempenho Estrutural	61	29.1	05	14.7	17	24.3
Material	30	14.3	03	08.8	16	22.0
Geral	23	11.0	05	14.7	15	21.4
TOTAL	210	100	34	100	70	100

Pode-se depreender do quadro apresentado que na recente produção científica internacional predominam os trabalhos a respeito de aplicações e desempenho estrutural. No caso nacional, representado pela Escola de Engenharia de São Carlos/USP, há um equilíbrio entre as 4 áreas.

Portanto, caso a tecnologia disponível para a execução de componentes pré-fabricados de argamassa armada seja potencialmente tão viável quanto a da própria pré-fabricação do concreto armado o foi até agora, faz-se necessário estudá-la em todos os seus aspectos, principalmente durabilidade e viabilidade econômica, explorando ao máximo os avanços recentes ocorridos na família dos concretos estruturais, particularmente numa analogia direta com o CAD-Concreto de Alto Desempenho.

É neste contexto que se opta por estudar o microconcreto armado como uma alternativa para a execução de componentes e elementos pré-fabricados para sistemas construtivos industrializados, tendo como objetivo final apresentar parâmetros para desenvolvimento de um microconcreto armado de última geração, à luz de uma analogia direta com a tecnologia do CAD-Concreto de Alto Desempenho.

Por outro lado, embora existam condições objetivas para o surgimento de uma nova geração de pré-fabricados leves de concreto, isto é, produtos com uma maior densidade tecnológica, diversos problemas, normalmente atribuídos ao mercado, têm impedido a expansão deste segmento.

Todavia, é conveniente lembrar que o mercado é constituído tanto pela demanda como pela oferta, e a oferta de produtos pré-fabricados atualmente ainda é extremamente limitada, não apenas do ponto de vista tecnológico, mas particularmente no que se refere à variedade dos componentes e do seu desenho. Atualmente pode-se pré-fabricar todas as partes de um edifício, porém, ainda há uma grande distância a ser percorrida para que isso venha a acontecer.

Apesar do senso comum de que os sistemas construtivos pré-fabricados são extremamente adequados a programas massivos de construção, onde é possível se obter uma maior repetitividade e, portanto, atingir-se uma economia de escala com maior facilidade, como no caso de habitações populares, escolas ou indústrias, no momento atual a ênfase vem recaindo sobre os sistemas abertos. Vê-se a antiga polêmica entre pré-fabricação leve ou pesada como um tema cada vez mais superado, o qual também não representa um obstáculo aos avanços desejados.

As grandes questões que se colocam referem-se a como diminuir o consumo de materiais no edifício, como aligeirar os componentes construtivos de modo a otimizar o seu transporte e tornar mais seguro o seu manuseio em obra, como reduzir ao mínimo a incidência dos custos dos equipamentos de montagem, como agregar valor aos pré-fabricados (SERRA e CAMPOS, 1999).

Por sua vez, a composição do mercado, voltado anteriormente, no caso brasileiro, quase que exclusivamente para o chamado pré-fabricado estrutural, segue agora uma tendência iniciada há cerca de duas décadas nos países desenvolvidos, cedendo lugar não apenas aos pré-fabricados arquitetônicos, mas principalmente aos paisagísticos.

Na verdade, são as próprias oscilações do mercado que acabam por conduzir a um aumento na variedade de produtos, incluindo os elementos estruturais,

arquitetônicos e paisagísticos. Isso para não falar nas perspectivas promissoras na área de saneamento e infra-estrutura.

Portanto, não há exagero em afirmar que o potencial da pré-fabricação em concreto no Brasil é enorme e vai muito além dos modestos 4% que o setor ocupa na cadeia de consumo do cimento. Cabe aos produtores aumentar a oferta, através de uma maior variedade, com melhor projeto e com tecnologia mais avançada.

O MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

A utilização nos EUA de concretos de “alta resistência” em edifícios altos passa a ocorrer de maneira mais significativa durante os anos 70, empregando-se, particularmente nos pilares, concretos cuja resistência era mais alta do que aquela dos chamados concretos usuais (AİTCIN, 1998). A tecnologia utilizada nestes casos ainda era a mesma dos concretos convencionais, a não ser pela seleção cuidadosa e controlada dos materiais constituintes.

No entanto, foi com o notável avanço verificado no desenvolvimento dos aditivos químicos para concreto, especialmente com a introdução dos assim chamados superplastificantes, que se tornou possível reduzir drasticamente a relação água/cimento ou água/aglomerante. Até então os aditivos fluidificantes eram usados para concretos usuais somente com a finalidade de melhorar as suas características de trabalhabilidade.

Embora a característica mais evidente de imediato nos concretos com uma baixa relação água/cimento ou água/aglomerante seja a sua maior resistência, com as possibilidades abertas pelos aditivos superplastificantes de última geração pôde-se perceber outras propriedades que podiam ser alcançadas, tais como uma menor permeabilidade, maior resistência à abrasão e, principalmente, uma maior durabilidade.

Segundo Aİtcin (AİTCIN, 1998), um concreto de alto desempenho pode ser definido essencialmente como um concreto tendo uma relação água/aglomerante baixa (com a adição de sílica ativa, a expressão *fator água/cimento* é substituída com

vantagem pela expressão *fator água/aglomerante*, considerando-se *aglomerante* o cimento mais a adição em pó¹).

Feita esta consideração, qual o paralelo que poderia ser estabelecido inicialmente entre a argamassa armada desenvolvida no Brasil a partir de 1960 e o conceito de concreto de alto desempenho?

O texto da norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada" – NBR-11173, publicada em 1989, no seu item 4.4.1.3.2 não deixa dúvida quanto ao fator água/cimento máximo admitido na produção de peças de argamassa armada, fixado em 0,45.

À época de publicação da norma em referência, um fator água/cimento variando de 0,40 a 0,42 era o limite normalmente utilizado nas fábricas de componentes pré-fabricados de argamassa armada que seguiam as especificações ali prescritas. Bentes apresenta um registro fiel e detalhado sobre o que foi o funcionamento de uma destas unidades produtivas implantadas no final da década de 1980 (BENTES, 1992), início de 1990, o Centro de Desenvolvimento de Equipamentos Urbanos e Comunitários da Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo-EMURB. Embora o valor máximo admitido pela norma fosse 0,45, o fator água/cimento praticado era em média 0,42, variando segundo o grau de dificuldade de preenchimento das fôrmas para cada tipo de componente pré-fabricado e considerando-se a não utilização de aditivos superplastificantes, cujo o uso ainda era pouco difundido no país, ao menos neste segmento produtivo.

Um fator água/cimento da ordem de 0,40 torna quase obrigatório o uso de dispositivos mecânicos para uma vibração enérgica da matriz durante o seu lançamento nas fôrmas, de modo a conferir-lhe trabalhabilidade sem o uso de

¹ N. A.: Aditivos (geralmente líquidos, em pequena proporção) não devem ser confundidos com adições (geralmente em pó, em proporção apreciável); tradicionalmente, convencionou-se que os aditivos não entram no cômputo da massa do aglomerante.

superplastificante. Esse valor, segundo Aitcin, é próximo ao valor teórico que Powers sugeriu no passado para assegurar a completa hidratação do cimento portland (POWERS, 1968).

Como parte dos estudos de dosagem e ensaios de resistência à compressão que foram realizados no âmbito deste trabalho, os quais são apresentados no Capítulo 9, foi reproduzido o traço da matriz da argamassa armada empregada pela fábrica da EMURB no início dos anos 90 (tabela 3.2).

Parte das características potenciais de alta resistência desta matriz, produzida segundo a norma, puderam ser comprovadas desde então, conforme pode-se depreender do Gráfico 3.1. Embora, logicamente, este não seja o único parâmetro a ser considerado, o fato é que a matriz da argamassa armada, na configuração em que esta se apresenta na NBR-11.173, originalmente utilizada na planta de produção da EMURB (1989-1993), alcançou uma resistência à compressão aos 28 dias de 57 MPa, para um fator água/cimento de 0,413, podendo ser classificada como um concreto de alto desempenho Classe I (resistência à compressão entre 50 e 75 MPa), conforme a classificação apresentada na Tabela 3.3. A classificação completa para concretos de alto desempenho, em cinco categorias, é proposta por Aitcin (AÏTCIN, 1998), que atribui ordens de grandeza em função da experiência acumulada e do atual estado-da-arte do concreto de alto desempenho.

Tabela 3.2 - Família de traços de referência (EMURB)

Consumo de cimento	Areia (m)	Fator a/ag
Traço rico	1,5	0,39
Traço médio	2,0	0,43
Traço pobre	2,5	0,50

observações: cimento - ARI, areia - média / zona 4, Índice de consistência NBR 7215 = 270mm

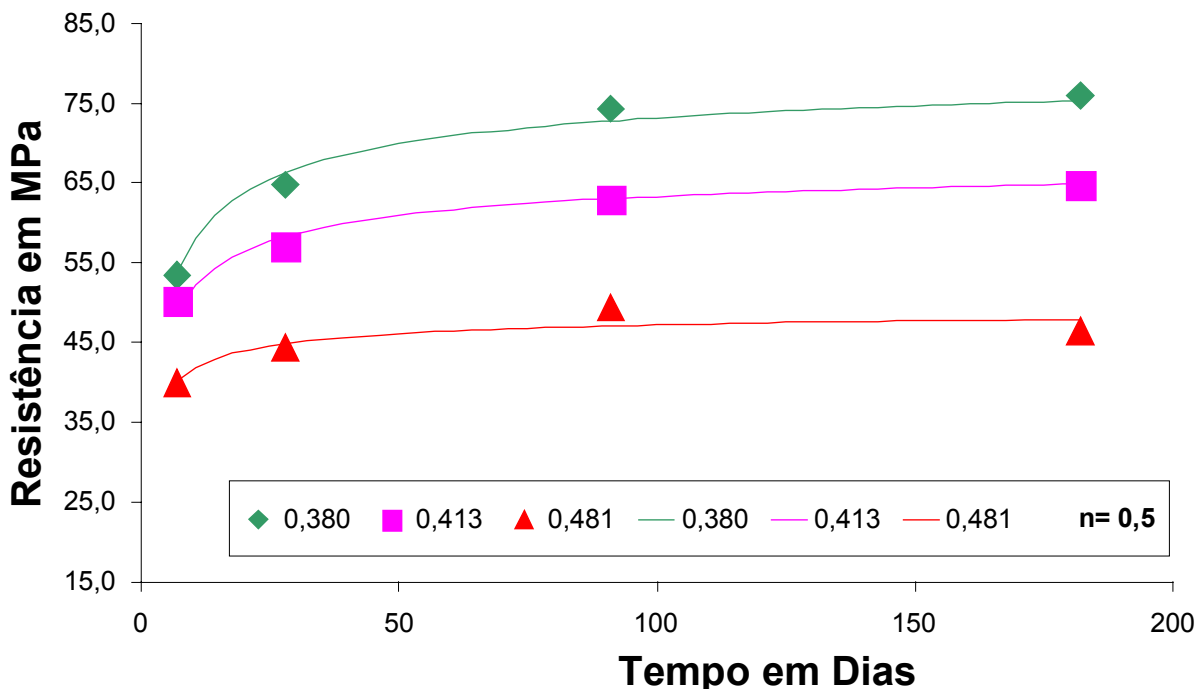


Gráfico 3.1-Série de ensaios nº 2 (SE-2) - Resistência à compressão em função do tempo por relação água/aglomerante (Família de traços I – Referência EMURB)

A legenda apresenta as relações água/aglomerante, respectivamente, dos traços rico, médio e pobre; e o expoente “n” adotado para linearização da função $\log \text{resistência} = F (\text{idade}^{-n})$ (TANGO, 2000).

Portanto, ao se enunciar aqui as possibilidades de desenvolvimento do microconcreto de alto desempenho, explorando-se ao máximo os avanços recentes ocorridos na família dos concretos, particularmente com relação ao concreto de alto desempenho, é importante observar que talvez um concreto com relação água/aglomerante de 0,38 não seja muito mais resistente e não apresente um desempenho muito melhor do que um outro com relação de 0,413. Entretanto, na medida em que esta relação diminui mais acentuadamente, os concretos usuais e de alto desempenho não só passam a ter resistências à compressão extremamente

diferentes, mas também microestruturas absolutamente distintas, levando a um desempenho em geral muito diferente.

É a partir dos resultados parciais inicialmente apresentados no Gráfico 3.1, que se acredita ser possível inovar e gerar uma matriz de última geração, capaz de abrir uma perspectiva promissora para as estruturas delgadas de concreto armado, apontando novos campos para sua possível aplicação na pré-fabricação, em função das suas propriedades de elevado desempenho. Na medida em que a matriz da conhecida argamassa armada pode ser considerada, potencialmente, um tipo particular de concreto de alto desempenho para estruturas delgadas ou laminares, propõe-se o desenvolvimento do que aqui se passa a chamar de microconcreto.

Tabela 3.3 - Classificação para concreto de alto desempenho

Classe de concreto de alto desempenho	I	II	III	IV	V
Resistência à compressão (MPa)	50	75	100	125	150

Fonte: AÏTCIN, Pierre-Claude. "High-performance concrete" (London, New York, E. & F. N. Spon, 1998)

Em suma, partindo-se da premissa de que a argamassa armada ou o microconcreto armado já possui características potenciais que tendem a um elevado desempenho, segundo a configuração adotada para o material na NBR-11.173, busca-se traçar um quadro de referência sobre as hipóteses a serem confirmadas quanto à resistência e durabilidade.

APRESENTAÇÃO DA TESE

Hanai comenta no capítulo final de seu livro "Construções de Argamassa Armada; Fundamentos Tecnológicos para Projeto e Execução" (HANAI, 1992) que "pode-se distinguir trabalhos mais voltados ao estudo das propriedades dos materiais daqueles mais dirigidos ao desenvolvimento de componentes e sistemas construtivos, algo semelhante à distinção entre 'hardware' e 'software'".

A partir daí, o mesmo autor afirma que em se tratando da argamassa em si, com toda a certeza um conjunto maior de informações sobre durabilidade constituiria “o mais poderoso agente definidor do efetivo potencial da tecnologia de estruturas delgadas”. Ou seja, eliminariam-se as dúvidas e as restrições ao seu uso, bem como seriam criadas novas especificações, estabelecendo-se limites para o emprego das “argamassas normais de cimento portland”, segundo o que prevê atualmente a norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada” (ABNT, 1990), ao mesmo tempo indicando-se a necessidade de desenvolvimento de matrizes cimentícias especiais, de alto desempenho, nas palavras de Hanai.

A esse respeito, parafraseando o Prof. Pierre Claude Aïtcin (AÏTCIN, 1998), poderia dizer-se atualmente que em cerca de dez anos, quando o microconcreto de alto desempenho não for mais algo extraordinário, a expressão “argamassa normal de cimento portland” não mais será apropriada para designar a matriz cimentícia até hoje empregada na argamassa armada.

Sendo assim, o desenvolvimento do microconcreto de alto desempenho justifica-se muito mais pela necessidade de conferir durabilidade às estruturas delgadas de concreto, do que propriamente pela busca de altas resistências à compressão.

Entretanto, há que se considerar também a otimização inerente ao desempenho estrutural dos componentes que venham a utilizar o microconcreto de alto desempenho como matriz, quem sabe retomando o pensamento de Torroja ao afirmar que “nenhum material podia dar origem, com tanta liberdade e eficácia, a formas variadas e resistentes, com espessuras mínimas e levezas utópicas, até poucas décadas”, ao falar sobre a cobertura laminar de concreto armado que projetou em 1957 para o Club Tachira (Caracas, Venezuela) (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999), cujo projeto arquitetônico é de Fruto Vivas (figura 3.4).

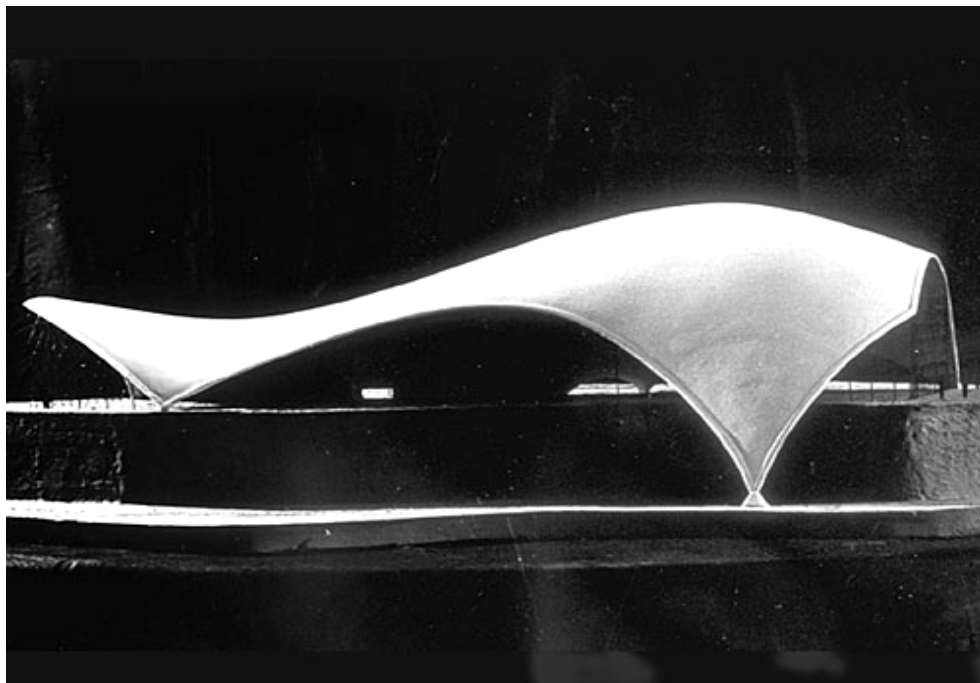


Figura 3.4 - Cobertura do Club Tachira (1957), em Caracas, Venezuela, com uma superfície de 60 x 34 m e uma espessura constante de 8 cm

Importante que se diga que projetar estruturas laminares não consiste no ato de simplesmente tornar mais leves as tipologias construtivas convencionais, através da diminuição das espessuras dos seus componentes. Trata-se de uma ruptura com as tipologias construtivas convencionais, quer do ponto de vista da engenharia de estruturas quer do ponto de vista da arquitetura.

Talvez por isso, possa se afirmar que a maior revolução que se pode esperar das aplicações do concreto de alto desempenho na construção civil não esteja no campo das estruturas moldadas no local, onde são sempre exaltadas as possibilidades oferecidas pelo novo material no sentido de diminuir as seções de pilares e vigas, aumentando com isso o espaço útil interno dos edifícios. Ainda assim é inegável a vantagem competitiva que representou o concreto de alto desempenho na reconquista recente do mercado que havia sido dominado pelas estruturas de aço na construção de edifícios em altura nos EUA (AÏTCIN, 1998).

A grande revolução que pode vir a ser desencadeada pelo concreto de alto desempenho na indústria da construção civil no Brasil, na opinião deste pesquisador, tem muito provavelmente uma estreita relação com o segmento da pré-fabricação, na

medida em o material pode agregar valor e aumentar a densidade tecnológica dos produtos oferecidos.

Hanai afirma, quando se refere à argamassa armada, que os estudos sobre a sua durabilidade “reagem, direta e interativamente, com o desenvolvimento de toda a tecnologia dos concretos estruturais”, citando como exemplo, justamente a tendência de se reduzir cada vez mais a espessura dos elementos pré-fabricados protendidos, o que “leva à produção desses elementos com argamassas estruturais” (HANAI, 1992).

Desta forma, depreende-se que, ao se referir neste trabalho ao desenvolvimento de um microconcreto de alto desempenho para estruturas delgadas, as questões aqui colocadas ultrapassam o campo temático daquela que se convencionou chamar de tecnologia da argamassa armada, interagindo diretamente com quadros semelhantes existentes em outras tecnologias da família dos concretos, tanto com relação à qualidade da matriz cimentícia aqui estudada, como por aspectos relativos aos processos de produção e à qualidade final do produto, no que este pesquisador concorda absolutamente com Hanai.

Por sua vez, a tipologia construtiva onde melhor podem ser aplicadas as potencialidades apresentadas pelas matrizes cimentícias de alto desempenho são, por certo, as estruturas laminares. Ou seja, repetindo uma vez mais, não se trata de simplesmente tornar mais leves as tipologias construtivas já há décadas empregadas nas plantas de pré-fabricados, repetindo à exaustão por vezes um modelo tecnológico já superado, chamado por Salas de “a primeira geração da industrialização da construção” (SALAS, 1981).

Diminuir espessuras dos componentes pré-fabricados, tornando-os leves e esbeltos, significa adentrar no campo das estruturas laminares e romper com o passado da pré-fabricação histórica nos moldes do pós-guerra europeu, seja na engenharia de estruturas seja na arquitetura.

Pier Luigi Nervi e Eduardo Torroja, na Europa, assim como Félix Candela, na América, pode-se dizer, renunciaram a “revolução” das estruturas laminares de

concreto armado através de suas obras, levando a limites impensáveis até então, a conjugação dos conceitos de forma estrutural e forma arquitetônica.

Arquivo Roger Clarck



Figura 3.4 - Hangar de Orvieto (1938), projetado por Nervi (1891-1972)

Não foi por acaso que Pietro Maria Bardi, o famoso idealizador e diretor do Museu de Arte de São Paulo, amigo pessoal de Nervi, escreveu um dia sobre o engenheiro de estruturas italiano o seguinte, conforme transcrição da revista “Engenharia e Arquitetura na Construção” feita por Hanai (HANAI, 1992):

“ Deve-se indicar Pier Luigi Nervi como alguém que procurou efetivar uma confluência da técnica da engenharia com a estética da arquitetura, demonstrando, junto com Freyssinet e Maillart, como as estruturas de materiais plásticos podem contribuir para estabelecer singulares formas a serem incorporadas na atividade artística”.

Bardi, citado por Hanai, comenta ainda que em meio a uma polêmica iniciada na Itália no início dos anos 1930, visando discutir a renovação da arquitetura, apontou o Estádio Esportivo de Berta (figura 3.5), em Florença, como uma

esplêndida obra arquitetônica, superando o fato de não ser projeto de um profissional dedicado à estética, mas de “um simples construtor”, segundo suas palavras (HANAI, 1992).

Mas quais seriam as razões que levaram estes verdadeiros inventores de formidáveis estruturas laminares a abandonarem esta tipologia construtiva, normalmente numa altura em que já haviam colocado em prática boa parte de suas ousadias? Seriam questionamentos relacionados à durabilidade ou ao desempenho estrutural que levaram Nervi a deixar de empregar o seu “ferro-cimento” a partir de 1960 ou Félix Candela a não mais construir suas estruturas laminares após 1971? Haveria algum paralelo histórico entre a revisão de que trata este trabalho, quando se refere à problemática da tecnologia da argamassa armada, e o pensamento daqueles pioneiros engenheiros construtores? As respostas a estas questões vêm de fontes distintas, mas são coincidentes em suas análises.

Hanai cita uma importante referência, nada mais nada menos que Mário Nervi, engenheiro e filho de Pier Luigi Nervi, que num artigo escrito para o 1st International Symposium on Ferrocement, realizado em 1981, em Bergamo, Itália, revela que a tecnologia do ferrocimento começa a declinar a partir de 1955, atingindo o seu limite crítico em 1960, quando houve a liquidação da SAFCA-Società Anonima Ferro-Cemento Applicazioni, fundamentalmente em consequência da alta incidência do custo da mão-de-obra nos empreendimentos (HANAI, 1992).

Considerando-se que o ferrocimento de Nervi tinha um consumo de cimento de 1000 kg por m³ e taxas de armadura da ordem de 500 kg por m³ (HANAI, 1992), em que pese a sua pequena espessura característica, chega-se facilmente à dedução de que havia uma componente de custo de mão-de-obra importante no material, referente ao trabalho artesanal dos armadores, numa época em que os salários na Itália já eram bem superiores aos verificados nos primeiros anos do pós-guerra.

Uma segunda referência consta no livro que trata da obra do notável engenheiro de estruturas espanhol, Eduardo Torroja, escrito há poucos anos atrás

por Fernández Ordóñez e Navarro Vera (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999), onde se relata que Félix Candela abandonou no México, em 1971, a construção de estruturas laminares, ante a impossibilidade de competir economicamente com outras tipologias. Os mesmos autores comentam ainda, a maneira como as construções laminares de concreto, projetadas sobretudo por Torroja, foram desaparecendo na medida em que a vantagem da economia de materiais, em função da pequena espessura das lâminas, foi gradativamente sendo neutralizada pelo aumento do custo da mão-de-obra.

Quanto à durabilidade destas construções laminares, é importante que se lembre que um material como o ferrocimento de Nervi, com os consumos de matérias-primas aqui citados, caracterizava-se por um altíssimo desempenho estrutural, comparável ao de materiais compostos, onde além da pequena espessura das lâminas destacava-se o comportamento “infissurável”.

Na medida em o ferrocimento foi introduzido no Brasil no ano de 1960, dando lugar à tecnologia da argamassa armada, conforme relata o Capítulo 1, buscou-se adaptá-lo às condições locais, através da diminuição do consumo de cimento e das taxas de armadura. Com um consumo de cimento de aproximadamente 700kg/m^3 , ao invés dos 1000kg/m^3 de Nervi, e taxas de aço compreendidas entre 250kg/m^3 e 300kg/m^3 , em lugar dos 500kg/m^3 do ferrocimento, o Grupo de São Carlos empreendeu passos decisivos para a otimização da tecnologia e sua conseqüente consolidação.

A partir daí, no entanto, a argamassa armada passou a ser, dentro dos limites da prática e da viabilidade econômica da tecnologia, conceitualmente mais próxima do concreto armado, um material associado e com uma fissuração controlada. As propriedades de estanqueidade e a durabilidade do material são explicadas, até certo ponto, por estas características, analisadas com maior profundidade no Capítulo 7 deste trabalho.

Finalmente, através da análise dos resultados de inspeções a obras construídas nos últimos vinte anos, apresentados no Capítulo 6, e dos ensaios em

laboratório realizados no IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, cujos resultados podem ser verificados no Capítulo 9, foi possível comprovar a estreita ligação entre o que hoje se convencionou chamar de concreto de alto desempenho e a matriz da argamassa armada desenvolvida no Brasil.

O desenvolvimento de um microconcreto de última geração, no entanto, à luz de uma analogia direta com a tecnologia do concreto de alto desempenho, produzirá um material identicamente de alto desempenho, o qual não só viabilizará as melhores expectativas que se tinha para com a tecnologia da argamassa armada, respondendo definitivamente às indagações existentes sobre as expectativas de sua vida útil, bem como possibilitando uma quebra de paradigmas e, sobretudo, de falsos paradigmas existentes à volta do passado recente da tecnologia, os quais acabaram por arrefecer momentaneamente as perspectivas para o seu desenvolvimento.

Neste sentido, analogamente à trajetória bem sucedida do concreto usual em direção ao concreto de alto desempenho, espera-se que a matriz da argamassa armada possa evoluir a partir dos novos conhecimentos gerados no âmbito da presente pesquisa, em direção ao microconcreto de alto desempenho, criando condições mais propícias ao desenvolvimento da pré-fabricação leve no país.

CAP. 4 - METODOLOGIA

O presente trabalho de pesquisa teve início com o reconhecimento do estado-da-arte, a colocação do problema e a formulação de premissas, ou hipóteses prévias, apresentadas no capítulo anterior, sobre as quais se montou o quadro de referências no qual está inserida a tese e as hipóteses a serem confirmadas.

Entre os antecedentes que nortearam a elaboração do presente trabalho estão a dissertação de mestrado deste pesquisador, intitulada “Industrialização da construção e argamassa armada; perspectivas de desenvolvimento” (CAMPOS, 1989) e o artigo de Hanai e El Debs escrito em 1994, intitulado “The future of ferrocement in the Civil Engineering Construction; some questions, answers and trends” (HANAI e EL DEBS, 1994).

Sobre estas duas referências e o seu significado para o desenvolvimento da presente pesquisa, pode-se dizer inicialmente que em 1989, sob a orientação do Prof. Dr. João Bento de Hanai, este pesquisador apresentou em sua dissertação para obtenção do título de mestre junto à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, aquele que poderia ser um modelo tecnológico diferenciado para o desenvolvimento da construção civil, distinto dos processos tão somente importados e adequado à estrutura econômica, social e cultural do País, com suas realidades regionais, o qual consistia de uma proposta de industrialização da construção à base de componentes leves de argamassa armada, como um caminho consolidado e possível àquela altura.

A experiência acumulada no Brasil indicava que era viável a implantação de fábricas de componentes pré-fabricados leves de argamassa armada, seja por iniciativa do poder público ou de empreendedores privados, a baixos custos de investimentos em capital fixo e com produtos de qualidade, como uma prática fundamental, e até certo ponto lógica, para que houvesse uma superação das enormes necessidades sociais até hoje existentes, particularmente na área habitacional (CAMPOS, 1989).

Mesmo com a tecnologia da argamassa armada colocada em evidência desde a década de 1980, tanto nacional como internacionalmente, em função do seu elevado desempenho estrutural e das obras a que deu origem, principalmente nas mãos do arquiteto João Figueiras Lima, a inexistência de dados suficientemente consistentes, particularmente sobre a durabilidade do material, arrefeceram momentaneamente o ânimo dos técnicos e pesquisadores que trabalhavam em seu desenvolvimento em meados dos anos 1990.

Este período de revisão e questionamento, acentuado após o lançamento do Programa dos CIAC's-Centro Integral de Apoio à Criança pelo governo federal, em 1993, conforme comentado no capítulo anterior, redundou no artigo de 1994 de Hanai e El Debs, dois dos principais membros do chamado Grupo de São Carlos, centro de excelência na tecnologia da argamassa armada vinculado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Acompanhando uma tendência internacional, explicavam os autores, havia fortes e objetivas restrições à tecnologia à época, particularmente no que se refere a durabilidade e custos, o que impedia o desenvolvimento da argamassa armada (HANAI e EL DEBS, 1994).

Tomando-se a premissa inicial de que a tecnologia argamassa armada já possuía características potenciais que tendiam a um elevado desempenho, segundo a configuração adotada para o material na norma NBR-11.173 (ABNT, 1990), a presente pesquisa buscou inicialmente traçar um quadro de referência sobre as hipóteses a serem confirmadas.

PLANO DE TRABALHO

O plano de trabalho adotado para o desenvolvimento da presente pesquisa foi revisado a partir dos modelos e conceitos estudados na disciplina de pós-graduação “Modelos na tecnologia da arquitetura”, ministrada pelo Prof. Dr. Geraldo Gomes Serra, e oferecida na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. A disciplina trata da natureza dos modelos, as técnicas de construção e de operação com modelos, iniciando-se pelo exame da questão geral do conhecimento e das metodologias de pesquisa. Uma conceituação básica a respeito dos diversos modelos é ali exposta e analisada,

indicando-se quais os tipos de modelos mais usuais nas pesquisas em arquitetura e urbanismo e examinando-se a seguir as suas limitações, a partir de uma análise crítica.

O plano de trabalho para se alcançar os objetivos propostos na pesquisa, tomando como base as referências bibliográficas e as notas de aula da disciplina de pós-graduação em referência, foi dividido basicamente em duas etapas, cada uma das quais com suas atividades e métodos específicos, a saber: levantamento de dados secundários ou formulação da base teórica e levantamento de dados primários ou formulação da base empírica.

Um documento interno elaborado pelo Prof. Dr. João Bento de Hanai (HANAI, 1996) com a finalidade de servir como guia na elaboração de projetos de pesquisa na área de tecnologia também foi de grande utilidade. Na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma de metodologia de pesquisa proposto por Hanai (HANAI, 1996), julgado extremamente adequado para as finalidades desta pesquisa, à luz do qual também foi definido o conjunto de métodos adotados.

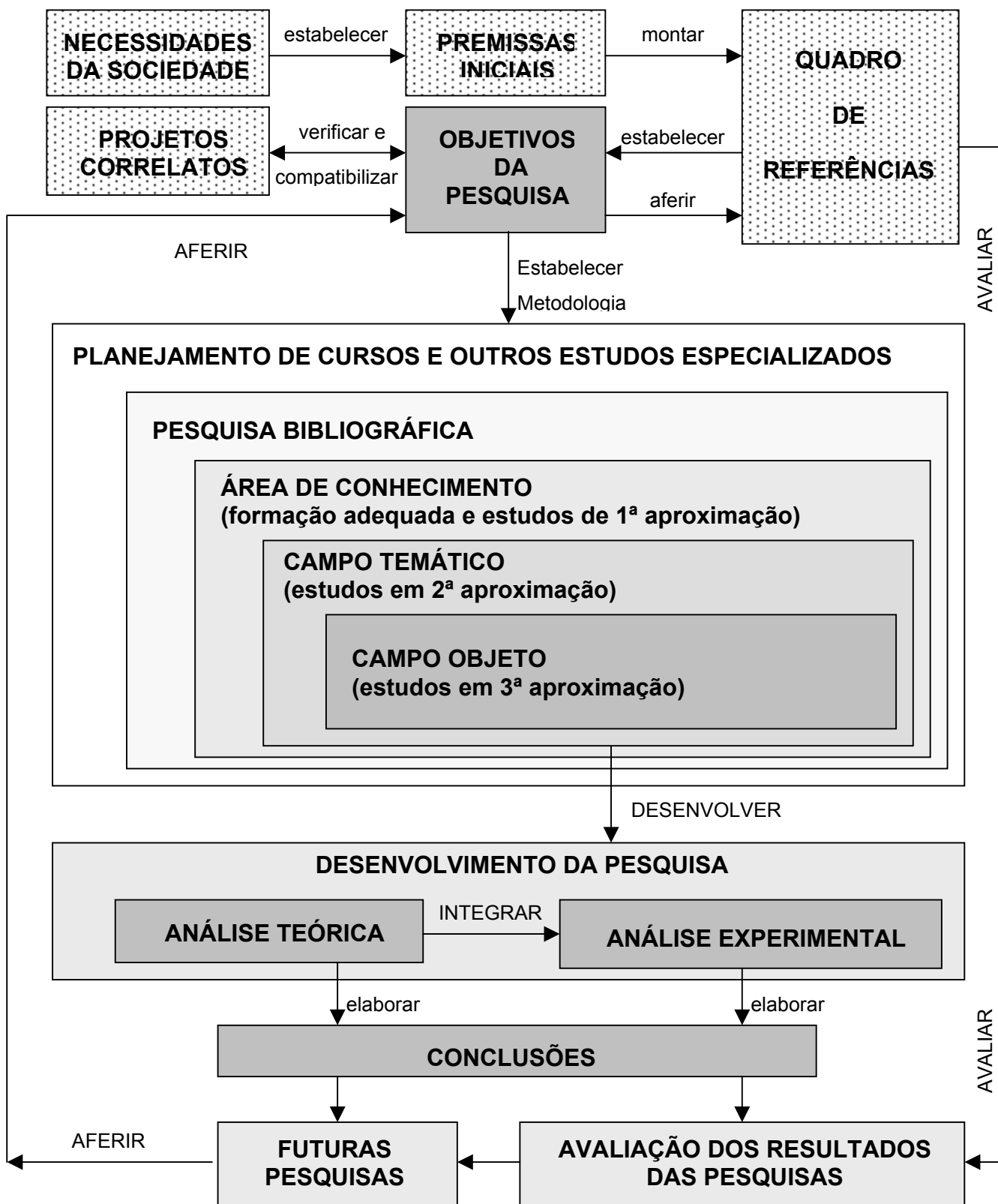
Cada uma destas etapas de desenvolvimento da pesquisa é detalhada a seguir, de modo a melhor descrever o conjunto dos métodos empregados no trabalho. São elas:

1. Embasamento teórico

Nesta etapa o trabalho realizado consistiu basicamente na revisão das referências bibliográficas mais relevantes, sob a forma de artigos técnicos, dissertações/teses e livros, de modo a estabelecer o estado-da-arte no campo objeto da pesquisa.

Procedeu-se a parte substancial do levantamento previsto, com especial ênfase à produção acadêmica mais recente do chamado “Grupo de São Carlos”, grupo de pesquisa ligado ao Departamento de Estruturas e ao Departamento de Arquitetura da Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP, reconhecido no país e no exterior como centro de excelência no tema pré-fabricação de concreto e argamassa armada.

Figura 4.1 – Metodologia de pesquisa - Fluxograma



Obteve-se acesso à literatura atualizada sobre o tema “ferrocimento”, designação aceita internacionalmente para a tecnologia da argamassa armada, através da leitura dos anais do 6th International Symposium on Ferrocement, ocorrido no início de junho de 1998, na University of Michigan (LAMBOT SYMPOSIUM, 1998). Recentemente teve-se acesso aos anais do sétimo e último “International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites”, realizado em Singapura no ano 2000, o qual traz uma indicação importante em seu próprio nome, quando menciona, além da expressão “ferrocimento”, um outro termo familiar a este trabalho: “elementos delgados de materiais compostos reforçados”. Este tema subjacente é abordado no capítulo final deste trabalho, quando se fala a respeito das perspectivas futuras para o microconcreto e a pré-fabricação leve.

A leitura de alguns dos trabalhos apresentados durante o 40^o Congresso Brasileiro do Concreto, realizado no Rio de Janeiro no mês de agosto de 1998, sob os auspícios do IBRACON-Instituto Brasileiro do Concreto, foi de grande valia para a verificação de dados experimentais obtidos em pesquisas sobre CAD realizadas no país e no exterior. Particularmente a assistência ao painel realizado sob a coordenação do ACI-American Concrete Institute, durante o mesmo Congresso, trouxe importantes contribuições à pesquisa.

Neste mesmo período foi traduzido por este pesquisador o artigo "Innovative applications of superplasticizers for producing high-performance concrete" de V. Mohan Malhotra, o qual também consta dos Anais do 40^o Congresso Brasileiro do Concreto. Posteriormente a tradução foi publicada na revista "Téchne" (set/out - n^o36, São Paulo, PINI, 1998) sob o título "Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho".

Ademais da literatura citada, a leitura de capítulos do livro "Propriedades do Concreto" de Adam Neville (PINI, 1997), muito contribuíram para a realização dos ensaios e a posterior confrontação de resultados parciais.

Foi de grande valia para a verificação de dados experimentais obtidos em pesquisas sobre concreto de alto desempenho realizadas no país e no exterior, a leitura de alguns dos trabalhos publicados nos anais dos seguintes encontros:

- 5º Congresso Brasileiro do Cimento, realizado em São Paulo de 8 a 12 de Novembro de 1998, sob os auspícios da Associação Brasileira de Cimento Portland;
- 2ª Conferência Internacional sobre CAD-Concreto de Alto Desempenho, realizada em Gramado-RS, em meados de 1999, sob a coordenação do ACI-American Concrete Institute; e
- CONPAT 99 - Congresso de Patologia, realizado em Outubro de 1999, na cidade de Montevideu (Uruguai).

Neste mesmo período foi iniciada por este pesquisador a colaboração na revisão da tradução do livro "High-performance concrete" (London, New York, E. & F. N. Spon, 1998) de autoria do Prof. Pierre-Claude Aïtcin, da Universidade de Sherbrooke (Canadá), de responsabilidade do Prof. Dr. Geraldo Gomes Serra.

Trata-se de uma das mais completas obras sobre CAD-Concreto de Alto Desempenho na atualidade. Nela estão contidos os princípios gerais do CAD, as propriedades mais relevantes dos materiais que o constituem, os métodos para a sua dosagem, a sua produção e lançamento em obra, a cura, as propriedades do material no estado fresco etc. O livro traz também importantes informações sobre a microestrutura do material, os mecanismos de fissuração, o uso de aditivos e adições e outras informações de fundamental interesse para a presente pesquisa. Além disso, são apresentadas as propriedades mecânicas excepcionais deste concreto e suas características relacionadas à durabilidade. Por fim, fala-se ainda do concreto de altíssima resistência e sugerem-se perspectivas para o desenvolvimento do CAD.

Além do livro de autoria do Prof. Aïtcin, adotou-se como literatura básica outros dois títulos também julgados obrigatórios: "Concreto: estrutura, propriedades e materiais" de Mehta e Monteiro (São Paulo, PINI, 1993) e "Propriedades do Concreto" de Neville (PINI, 1997), já citado, que em conjunto complementam aquilo que poderia se chamar de "núcleo duro" para a conceituação geral e a realização dos ensaios, assim como a posterior confrontação de resultados.

Além das referências bibliográficas, outras referências não bibliográficas também foram consideradas, tais como depoimentos e entrevistas concedidos por reconhecidos especialistas no tema, tais como o Prof. Dr. João Bento de Hanai, o Prof. Dr. Jefferson Libório e o Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs, da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, além do Dr. Engº Carlos Eduardo de Siqueira Tango, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. As entrevistas programadas visaram captar as tendências atuais nas linhas de pesquisa voltadas para o campo de estudo e verificar quais projetos de pesquisa se encontravam em andamento.

Em maio de 1998, este pesquisador também teve o grande privilégio de estar entre os assistentes de uma palestra proferida pelo ilustre engenheiro de estruturas espanhol, Dr. José Antonio Fernández Ordóñez, no Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", em Madri, quem à época estava concluindo o livro intitulado "Eduardo Torroja Miret, ingeniero, engineer", publicado em 1999 (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999), cerca de um ano antes do seu falecimento. Tanto a palestra, como posteriormente o livro de Fernández Ordóñez, escrito em co-autoria com Navarro Vera, deram um novo alento às convicções que impulsionaram o início desta pesquisa.

A partir daí foram estabelecidas as hipóteses a serem confirmadas e desenvolvidas as estratégias para conduzir a busca das provas.

2. Base empírica

Tratou-se nesta etapa da confirmação da premissa inicial, desenvolvendo-se para tanto uma metodologia para inspeções técnicas às obras executadas no período de 1980 a 1993, compreendendo os procedimentos de inspeção, a definição de critérios de avaliação e análise dos resultados e a consolidação de resultados parciais.

2.1 Inspeções de campo

A princípio foi desenvolvida uma metodologia para inspeção das obras executadas com pré-fabricados de argamassa armada, imprescindível ao início desta etapa dos levantamentos de campo.

As inspeções serviram de base à análise das condições gerais das obras selecionadas, no que se refere à fissuração, corrosão de armaduras, propriedades físicas e químicas e resíduos depositados.

Inicialmente, adotou-se como base a metodologia empregada pelo Prof. Jefferson Libório da EESC-USP, na inspeção técnica realizada na cobertura do Terminal Rodoviário “Rita Maria” (Florianópolis-SC), em Setembro de 1986.

Posteriormente, a partir da formalização de convênio de estágio junto ao IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, visando particularmente a execução da etapa prevista de ensaios, aprimorou-se esta metodologia através da incorporação de procedimentos de inspeção usualmente empregados pelo IPT em obras de concreto convencional, conforme se apresenta no Capítulo 6 deste trabalho.

As inspeções técnicas conformaram o ponto de partida da pesquisa, de modo a se esclarecer as possíveis causas quanto a patologias eventualmente surgidas e aspectos a serem de fato melhorados relativamente à durabilidade do material, com base nas análises técnicas e nos ensaios procedidos. Além disso, as inspeções possibilitaram um maior domínio dos conhecimentos referentes à tecnologia estudada.

2.2 Estudos da microestrutura e dosagem dos microconcretos

Tomando como base os resultados parciais da pesquisa de campo realizada, nesta fase foram aprofundados os estudos sobre a microestrutura das matrizes cimentícias e os mecanismos de fissuração, fixando-se a resistência do concreto à compressão simples como um dos parâmetros de avaliação e análise das matrizes de alto desempenho estudadas. Tendo em vista a conhecida influência positiva que os aditivos superplastificantes e a adição de sílica ativa podem exercer na obtenção de matrizes cimentícias de alto desempenho, os estudos de dosagem procuraram aprofundar o conhecimento das alterações que estes produtos provocam sobre a reologia do concreto no estado fresco e as propriedades finais do concreto endurecido.

2.3 Dosagem dos microconcretos

Foi desenvolvida uma metodologia própria para a dosagem de microconcretos, com base no Método de Dosagem IPT, aplicada passo-a-passo desde a seleção e preparação dos materiais até os procedimentos de ensaio, conforme se apresenta no Capítulo 8 deste trabalho.

A partir daí foram propostas três situações de estudo, as quais consistiram basicamente no desenvolvimento de três famílias de traços de microconcreto, abrangendo desde a já conhecida matriz da argamassa armada (referência) até traços para microconcreto de alto desempenho incorporando aditivo superplastificante e/ou adição de sílica ativa, de modo a superar largamente as resistências características das argamassas estruturais já conhecidas.

Os traços estudados nas séries de ensaios SE-1 e SE-2 apresentadas nos Capítulos 8 e 9 do trabalho foram formulados variando-se os consumos de cimento em 3 níveis (rico, médio e pobre).

Foram três as situações de estudo para o desenvolvimento de traços para argamassa ou microconcreto de alto desempenho:

- a) TRAÇO I - Reprodução do traço típico para microconcreto estrutural de cimento e areia utilizado na usina de pré-fabricados da EMURB- Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo, no período de 90 a 93, desenvolvido segundo a norma brasileira NBR-11173;
- b) TRAÇO II - Desenvolvimento de um segundo traço incorporando-se aditivo superplastificante ao microconcreto, como redutor de água e de forma a baixar o consumo de cimento;
- c) TRAÇO III - Desenvolvimento de um terceiro traço incorporando-se aditivo superplastificante e adição de sílica ativa ao microconcreto, de modo a superar a resistência característica habitual dos microconcretos obtidos com o TRAÇO I, da ordem de 50 MPa.

2.4 Ensaios de resistência à compressão

Foram moldados 2 corpos de prova por situação para ensaios à compressão a 6 idades, variando entre 3 e 182 dias, perfazendo um total de 108 corpos-de-prova 50mm por 100mm para cada série de ensaios (SE1 e SE2) ou 216 corpos-de-prova no total.

Duas séries de ensaios foram executadas, devido à série de ensaios SE-1 apresentar problemas, indicando a necessidade de uma revisão nos procedimentos, motivo pelo qual foi interrompida aos 28 dias, conforme pode ser verificado no Capítulo 9 deste trabalho.

A série de ensaios SE-2, por sua vez, após sofrer os ajustes necessários possibilitou uma confirmação parcial das hipóteses, no tocante às resistências à compressão alcançadas, apresentadas no Capítulo 9.

A execução e a posterior análise dos ensaios em referência foram feitas sob a supervisão do Dr. Engº Carlos Eduardo de Siqueira Tango, Pesquisador do IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, em cujos laboratórios foi realizada a parte experimental da pesquisa.

2.5 Estudos e avaliações da durabilidade do microconcreto

Abordou-se nesta etapa a questão crucial da durabilidade, recolocando-se inicialmente a questão da vida útil da obra de construção civil à luz do conceito de adequação tecnológica. A seguir buscou-se desenvolver uma metodologia para estudo dos aspectos mais diretamente relacionados à durabilidade, estudando-se as alternativas de métodos de ensaios que possibilitassem correlacionar as propriedades mecânicas de resistência à compressão das matrizes desenvolvidas, com uma avaliação qualitativa das suas respectivas porosidades, de modo a melhor poder caracterizá-las.

Os estudos qualitativos da microestrutura dos microconcretos endurecidos empregaram basicamente a análise petrográfica para uma melhor e mais expedita caracterização da durabilidade das matrizes obtidas, conforme apresenta o Capítulo 10.

Em suma, buscou-se aquilo que se poderia chamar a grosso modo de "a imagem da durabilidade", através de um estudo visual comparativo das características da microestrutura dos três traços desenvolvidos, conforme apresentado no Capítulo 10 do trabalho.

O estudo petrográfico de microconcretos endurecidos possibilita a observação das feições relacionadas à pasta, ao agregado e aos vazios, tais como sua proporção relativa, bem como tipos de vazios (fissuras, poros, etc.).

FORMULAÇÃO DAS CONCLUSÕES

A formulação das conclusões obedece a critérios que, partindo do embasamento teórico e da base empírica do trabalho, permitem afirmar que foram alcançados os objetivos propostos para a pesquisa.

Neste caso, a superação das dúvidas e a eliminação das restrições ao uso de elementos delgados de concreto armado, advêm do desenvolvimento das matrizes cimentícias especiais, de alto desempenho, o que permite concluir que as hipóteses inicialmente lançadas puderam ser comprovadas, na medida em que:

- a) A matriz da argamassa armada, da forma como é apresentada na norma NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada” (ABNT, 1990), possui de fato características potenciais que podem ser associadas à tecnologia atual do concreto de alto desempenho, seja quanto à sua resistência mecânica seja quanto à sua microestrutura;
- b) Ao se empregar os aditivos superplastificantes como redutores de água nas matrizes de microconcreto, seja possível alcançar uma combinação de desempenho e economia extremamente positiva, incrementando-se a resistência mecânica e ao mesmo tempo baixando o consumo de cimento ;
- c) Seja possível se obter resistências extremamente elevadas com o microconcreto, empregando-se aditivos superplastificantes como redutores de água e materiais cimentícios suplementares como a sílica ativa; e
- d) Seja possível verificar-se que, para além de uma resistência mecânica elevada, as matrizes cimentícias obtidas possuam uma microestrutura capaz de garantir uma maior durabilidade, visto que há uma forte correlação entre a baixa relação água/aglomerante característica destas matrizes e a diminuição da permeabilidade aos íons cloreto, o que oferece uma perspectiva de aumento da vida útil para os elementos delgados executados com o microconcreto.

A retomada de uma perspectiva promissora para as estruturas delgadas de concreto armado, apontando novos campos para sua possível aplicação na pré-fabricação leve, a partir da comprovação das propriedades de elevado desempenho do microconcreto aqui preconizado, representa para este pesquisador o significado máximo que pode ser alcançado por este trabalho.

CAP. 6 – BASE EMPÍRICA

Conforme já dito nos capítulos iniciais, interessa neste trabalho, sobretudo, verificar a procedência e o mérito dos questionamentos de ordem tecnológica feitos à argamassa armada durante a década de 1990, na medida em que tais questionamentos, ainda que difusos e por vezes sem fundamento, representaram um forte desestímulo à pesquisa acadêmica e à aplicação da tecnologia. Verificar também se tudo aquilo que se construiu sob a designação “argamassa armada” seguiu um mesmo conjunto de critérios técnicos, especialmente após a publicação da norma NBR-11.173 de "Projeto e execução de argamassa armada".

Para isso, foi necessário aprofundar as informações sobre patologias surgidas entre o conjunto das obras executadas após 1980, adotado neste trabalho como marco temporal do início do período de maior difusão e aplicação da tecnologia no país, inspecionando-as e buscando compreender qual a origem destas patologias, visando melhor caracterizar a tecnologia nos dias de hoje e estabelecer um referencial sobre a sua evolução recente no Brasil.

Por sua vez, com a realização de estudos de dosagem para obtenção de uma matriz de microconcreto de alto desempenho, denominação proposta para uma nova geração de matrizes de argamassa armada, numa analogia direta com o concreto de alto desempenho, espera-se restabelecer alguns paradigmas a respeito das estruturas delgadas de concreto armado, como forma de romper uma imagem negativa que se criou à volta do passado recente de algumas obras associadas à designação "argamassa armada", cujo efeito foi arrefecer momentaneamente as perspectivas para o seu desenvolvimento.

Através da interpretação dos resultados de ensaios de resistência à compressão e da análise petrográfica de amostras destas matrizes de microconcreto, procura-se a seguir demonstrar qualitativamente as propriedades de elevado desempenho do material resultante destas novas configurações, particularmente quanto à durabilidade.

A descrição detalhada das inspeções e dos ensaios realizados, bem como as análises e considerações daí decorrentes são expostas na seqüência.

INSPEÇÕES TÉCNICAS

No início de 1998 foi desenvolvida a metodologia para inspeção das obras executadas com pré-fabricados de argamassa armada, imprescindível ao início desta etapa dos levantamentos de campo.

Nas inspeções foram observadas as condições gerais das obras selecionadas, no que se refere à fissuração, corrosão de armaduras, propriedades físicas e químicas e resíduos depositados.

Inicialmente, adotou-se como base a metodologia empregada pelo Prof. Dr. Jefferson Libório, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, na inspeção técnica realizada na cobertura do Terminal Rodoviário “Rita Maria” (Florianópolis-SC), em setembro de 1986 (LIBÓRIO, 1986).

Posteriormente, com a colaboração do Dr. Eng^o Carlos Eduardo de Siqueira Tango, do Agrupamento de Materiais de Construção Civil do IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas, aprimorou-se esta metodologia através da incorporação de procedimentos de inspeção usualmente empregados pelo Instituto em obras de concreto convencional.

Tomando-se então como referência a norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada”, publicada em 1990, as obras foram divididas basicamente em dois grupos, a saber:

- I. Obras executadas segundo a norma - aquelas que, realizadas após a publicação da NBR-11.173, apresentavam evidências ou registros documentais de sua aplicação;
- II. Obras executadas fora de norma - aquelas compreendidas no período arbitrado entre 1980 até 1990, onde obviamente inexistia o documento normativo, podendo estender-se às obras produzidas posteriormente à publicação da NBR-11.173, as quais apresentassem evidências documentais de não observância aos preceitos ali preconizados.

Após inspeções preliminares, as obras selecionadas para aplicação da metodologia e realização das análises comparativas foram as seguintes (em ordem cronológica de realização das inspeções):

- CETET-Oeste, edifício localizado no bairro da Barra Funda (São Paulo-SP, 1993)
- CTRS-Centro Tecnológico da Rede Sarah (Salvador-BA, 1994)
- Instituto Municipal de Educação Prof. José Arapiraca, localizado no bairro da Boca do Rio (Salvador, 1989)
- Escadarias drenantes localizadas ao longo da Avenida Vale das Pedrinhas (Salvador, 1980)

A metodologia passou a ser aplicada inicialmente no segundo semestre de 1998 no CETET-Oeste, em São Paulo, e posteriormente, no início de 1999, foram inspecionadas as obras existentes em Salvador-BA, as quais conformam o mais representativo parque construído com a tecnologia da argamassa armada no país, executado ao longo de três períodos distintos: 1980, 1987 e 1993 até a atualidade.

As inspeções em Salvador-BA foram feitas com a colaboração da Eng^a Célia Martins Neves, do CEPED-Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia, que funcionou como sede das atividades planejadas, na medida em que a instituição colocou à disposição deste pesquisador, tanto as instalações do LEC-Laboratório de Engenharia Civil como o pessoal técnico para apoiar os trabalhos de campo.

A metodologia empregada para a inspeção e análise das condições gerais das obras selecionadas foi sempre a mesma, quer para as obras de São Paulo quer para as obras de Salvador.

Os procedimentos gerais de inspeção utilizados incluíram:

- mapeamento e medição de abertura de fissuras;
- levantamento de focos de deterioração;
- avaliação da espessura de carbonatação nas peças, através da aplicação de solução de fenolftaleína em pontos predeterminados.

Os equipamentos e materiais utilizados nas inspeções, custeados parcialmente com recursos da FAPESP-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, foram os seguintes:

- Régua comparadora de fissuras mais lupa de aumento;
- Talhadeira fina de aço mais marreta;
- Paquímetro;
- Solução de fenolftaleína;
- Câmera fotográfica;
- Invólucros para coleta eventual de material para análises químicas em laboratório;
- Mapas e planilhas para levantamento (tabela 6.2) e indicação gráfica de fissuras e focos de deterioração; e
- Projeto (módulo-padrão das obras pré-fabricadas).

A classificação dos níveis de danos empregada baseou-se nos critérios estabelecidos no Boletim 162 CEB (TANGO, 2001), a saber:

Tabela 6.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE DANOS

ASPECTOS VISUAIS	Níveis de dano (entre parêntesis, classificação original do CEB)					
	I (sem classificação CEB)	II (A)	III (B)	IV (C)	V (D e E)	
Alteração de cor	Não aparente	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão
Fissuração	Não aparente	longitudinal	longitudinal + estribos	generalizada	generalizada	generalizada
Destacamento do cobrimento	Não aparente	—	pouco	generalizado	generalizado	generalizado
Redução seção de armadura	—	—	5%	10%	25%	Estribos seccionados
Flechas (deformação)	—	—	—	—	possíveis	visíveis

Obs: O nível I destina-se às obras sem problemas detectáveis a olho nu; o nível V é considerado inaceitável.

Tabela 6.2 - PLANILHA PARA INSPEÇÕES DE OBRAS

Projeto: DA ARGAMASSA ARMADA AO MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO						
Obra inspecionada:						
Ano de fabricação/montagem:				Procedência:		
Ambiente (salinidade do ar, umidade relativa, perfil das temperaturas, zona industrial-poluição)						
a) INSPEÇÃO VISUAL PRELIMINAR (descrição sucinta das anomalias verificadas e fotografias)						
b) CLASSIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE DANOS						
Trecho	Exame visual					Classificação de I a V
APÊNDICE – Classificação segundo o boletim 162-CEB						
ASPECTOS VISUAIS	Níveis de dano (entre parêntesis, classificação original do CEB)					
	I (sem classificação CEB)	II (A)	III (B)	IV (C)	V (D e E)	
Alteração de cor	Não aparente	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão
Fissuração	Não aparente	longitudinal	longitudinal + estribos	generalizada	generalizada	generalizada
Destacamento do cobrimento	Não aparente	—	pouco	generalizado	generalizado	generalizado
Redução seção de armadura	—	—	5%	10%	25%	Estribos seccionados
Flechas (deformação)	—	—	—	—	possíveis	visíveis

Tabela 6.2 - PLANILHA PARA INSPEÇÕES DE OBRAS (continuação)

c) PONTOS DE AMOSTRAGEM E ANÁLISES			
Ponto	Espessura de cobrimento (mm)	Profundidade de carbonatação (mm)	Coleta de material (sim/não)

d) EXAME VISUAL DE FISSURAS		
Peça	Direções (Long/Transv/Inclin)	Aberturas máximas (mm)

e) EXAME VISUAL DE FISSURAS

Tabela 6.2 – PLANILHA PARA INSPEÇÕES DE OBRAS (continuação)

f) INSPEÇÕES TÉCNICAS: AMOSTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO		
<ul style="list-style-type: none"> • espessura de cobrimento • profundidade de carbonatação • teor de cloretos monitoramento do ambiente (salinidade do ar, unidade relativa, perfil da temperaturas, zona industrial) <p><u>Observação importante:</u></p> <p>As amostras e as determinações serão orientadas para pontos onde o concreto encontre-se íntegro.</p>		
<p>A classificação será feita tomando como base a obra em sua totalidade ou partes representativas do todo, da seguinte forma:</p>		
UNIDADE	EXAME VISUAL	CLASSIFICAÇÃO
MÓDULO 1		I a V em algarismos romanos
<p>Onde:</p> <ul style="list-style-type: none"> I. módulo sem problemas detectáveis a olho nú II. nível A III. nível B IV. nível C V. nível D e E 		

PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO

As atividades de inspeção seguiram o seguinte roteiro:

- a) elaboração de croquis da obra a ser inspecionada;
- b) levantamento do histórico da obra, compreendendo: data de fabricação, data de montagem, procedência dos componentes, características do projeto (resistência mecânica, disposição de armadura das peças-tipo mais importantes, espessuras de cobrimento) etc.;
- c) inspeção visual preliminar;
- d) descrição sucinta de patologias e focos de deterioração, com registro fotográfico;
- e) classificação segundo a Tabela 6.1 (base: Boletim 162 - CEB).

A classificação geral foi feita tomando como base a obra em sua totalidade ou partes representativas do todo, na medida em que são obras modulares e executadas com peças de fabricação seriada.

Os procedimentos específicos adotados nas inspeções técnicas das obras selecionadas consistiam basicamente em:

a) Determinação da espessura de cobrimento

- expor as armaduras e medir diretamente a espessura de cobrimento com paquímetro
- posição dos pontos: aleatória
- valor mínimo e valor máximo apurado

b) Exame visual das armaduras

- após expor a armadura, verificar eventuais sinais de corrosão e suas características (concentrada ou em forma de manchas)

c) Determinação da profundidade de perda de alcalinidade

- abertura do concreto para exposição das armaduras em pontos predeterminados, visando inicialmente medir a espessura de cobrimento
- posteriormente, pulverizar nas aberturas solução de fenolftaleína, medindo diretamente a espessura de carbonatação: região incolor (onde o pH é inferior a 8,3)
- a ausência de carbonatação é indicada pela cor violeta

d) Exame visual de fissuras

- após verificação das regiões da obra que apresentam concentração de fissuras, indicar as características e direção das mesmas (mapeamento)
- verificar as aberturas das fissuras através com o auxílio de régua comparadora e lupa

Cumpre esclarecer que as armaduras são passivadas ou naturalmente protegidas da corrosão no ambiente alcalino da pasta de cimento, podendo corroer-se, principalmente, em decorrência da carbonatação da matriz e da presença de cloretos na mesma.

Quanto à carbonatação, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, um dos componentes da pasta de cimento, e responsável pelo pH alcalino, ao se carbonatar ou reagir com o CO_2 gasoso do ar, forma o CaCO_3 . Conforme Neville (NEVILLE, 1997), a importância da carbonatação com relação à durabilidade é o fato de que ela reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento, despassivando a armadura. A proteção das armaduras depende diretamente da camada passivadora decorrente da matriz à sua volta, camada esta que se solubiliza quando a matriz passa a apresentar um baixo pH, abrindo caminho para a corrosão das armaduras. Por isso é fundamental conhecer a profundidade de carbonatação e, particularmente, saber se a frente de carbonatação está próxima das armaduras. O avanço da frente de carbonatação vai ser maior ou menor dependendo de vários fatores, dentre eles a permeabilidade do sistema de poros do concreto ou da argamassa, assim como a existência de fissuras, e condições ambientais.

Com a presença de cloretos, a corrosão da armadura também pode acontecer, pois estes íons podem promover a solubilização da camada passivadora até mesmo em ambiente alcalino. Os cloretos podem estar presentes na pasta de cimento em decorrência de sua penetração no interior do concreto ou argamassa endurecidos, ou por serem trazidos pelos materiais constituintes da mistura.

AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Entre as observações a que se pôde chegar após a inspeção de cada um dos edifícios ou equipamentos examinados, destacam-se:

I - Cetet-Oeste (São Paulo)

Procedência: Obra fabricada e montada pela EMURB-Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo, em 1993.

Características principais: Edifício escolar térreo, constituído por estrutura reticulada de pilares e vigas pré-fabricados de argamassa armada, coberto e fechado por lajes e painéis pré-fabricados do mesmo material. A espessura média das peças pré-fabricadas é de 20mm.

Ambiente: Zona urbana e industrial, atmosfera contaminada por líquidos e gases agressivos, umidade relativa do ar variável de média a alta.

Inspeção visual preliminar: Obra não apresenta defeitos generalizados, mas problemas isolados, alguns deles provocados por fatores alheios à tecnologia em foco. As espessuras de carbonatação (sensibilidade à solução de fenolftaleína) nas peças mais expostas, vigas de cobertura, não chegam a 1mm.

Classificação dos níveis de danos: nível I (tabela 1), tendo sido detectados somente problemas isolados, apesar da agressividade do ambiente e da total falta de manutenção do edifício.

II - CTRS-Centro Tecnológico da Rede Sarah

Procedência: Obra fabricada e montada pelo próprio CTRS, com projeto e coordenação do Arq. João Filgueiras Lima, em 1994.

Características principais: Edifício industrial térreo (pé-direito duplo) com mezanino, constituído por estrutura reticulada de pilares e vigas metálicos, coberto por telhas metálicas, tendo lajes de piso (mezanino) e painéis de fechamento executados em argamassa armada. A espessura média das peças pré-fabricadas de argamassa armada é de 20mm.

Ambiente: Zona urbana com atmosfera marinha e umidade relativa do ar média.

Inspeção visual preliminar: Obra não apresenta manifestações patológicas generalizadas evidentes em suas peças pré-fabricadas de argamassa armada (lajes e painéis de fechamento). Por outro lado, foram identificados vários pontos de retrabalho, estucamento e reparos localizados feitos com adesivos poliméricos. Há fissuras de pequena abertura (0,1mm) em várias peças, acompanhando a malha soldada da armadura, provavelmente provocadas por retração hidráulica. A porosidade da matriz empregada está acima do desejável, caso seja considerada a facilidade de penetração de fluidos e as suas conseqüências sobre a vida útil das peças. Tal característica fica evidente após a verificação das espessuras de carbonatação (sensibilidade à solução de fenolftaleína) nas peças mais expostas ao tempo, em geral chegando a 5mm nos painéis exteriores examinados (figura 6.1).

Classificação dos níveis de danos: nível I (tabela 6.1), tendo sido detectados somente problemas isolados, apesar da agressividade do ambiente.

III - Instituto Municipal de Educação Prof. José Arapiraca

Procedência: Obra fabricada e montada pela FAEC-Fábrica de Equipamentos Comunitários de Salvador, em 1989.

Características principais: Edifício escolar térreo, constituído por estrutura reticulada de pilares e vigas pré-fabricadas de argamassa armada, coberto e fechado por lajes e painéis pré-fabricados do mesmo material. A espessura média das peças pré-fabricadas é de 20mm.

Ambiente: Zona urbana com atmosfera marinha, sujeita a névoa salina constante.



Figura 6.1 – Espessura de carbonatação em peça do CTRS (Salvador-BA)

Inspecção visual preliminar: As peças, de uma maneira geral, apresentam fissuras de abertura considerável (0,5mm) acompanhando a malha soldada da armadura, provavelmente provocadas por retração hidráulica, ou seja, cura deficiente. Particularmente na fachada sul do edifício, mais submetida ao vento marinho dominante na região, os elementos pré-fabricados estavam sendo desmontados por ocasião da inspeção, no mês de fevereiro de 99, tendo em vista diversas peças estarem condenadas do ponto de vista estrutural. Não foram verificadas as espessuras de carbonatação, tendo em conta as evidências de despassivação já existentes, visíveis a olho nu.

Classificação dos níveis de danos: nível V (nível E do CEB), tendo sido detectada ruína parcial da obra, em seu lado sul (figura 6.2).

IV - Escadarias Drenantes

Procedência: Obra fabricada e montada pela RENURB-Companhia de Renovação Urbana de Salvador, em 1980.

Características principais: Escadarias constituindo ao mesmo tempo galerias de pequenas dimensões, visando a drenagem superficial das águas de chuva em assentamentos habitacionais precários. O modelo projetado é formado por módulos pré-fabricados de argamassa armada, dentro dos quais circulam as águas, encaixados entre si através de uniões tipo “ponta-e-bolsa” e cobertos por placas e degraus pré-moldados de concreto convencional. Os módulos pré-moldados têm massa equivalente a cerca de 50 kg, o que permite o transporte e montagem manuais, mesmo em estreitas vielas e encostas mais íngremes. A espessura média das peças é de 25mm. A finalidade principal das escadarias é possibilitar a drenagem superficial das águas de chuva em assentamentos precários localizados em encostas, os quais venham a constituir áreas de risco iminente de deslizamentos.

Ambiente: Zona urbana densamente ocupada, onde os agentes agressivos mais importantes passam a ser as águas servidas conduzidas para o interior das galerias, através de ligações domiciliares de esgoto. Trata-se também de uma alternativa para eliminar os esgotos a céu aberto.

Inspeção visual preliminar: Obra apresenta-se totalmente destruída, tanto pelo uso como pela manutenção inadequados. Por ocasião da inspeção, no mês de fevereiro do ano em curso, a Prefeitura de Salvador encontrava-se no assentamento realizando obras de instalação de tronco coletores e ligações domiciliares de esgoto.

Classificação dos níveis de danos: Não se aplica a classificação proposta, tendo em vista o nível de destruição em que se encontram os equipamentos. Todavia foram realizadas verificações das espessuras de carbonatação nas peças pré-fabricadas de argamassa armada, tendo as mesmas apresentado valores sempre inferiores a 1mm.

CONCLUSÕES PARCIAIS

No caso do IME Prof. José Arapiraca, cujas peças de argamassa armada foram fabricadas pela FAEC (1989), a ruína parcial da obra em seu quadrante sul demonstra que a agressividade da névoa salina, sempre presente no local, combinada com uma matriz muito porosa e um alto índice de fissuração, produziram as circunstâncias mais do que propícias para um processo acelerado de deterioração, o qual culminou com a condenação de boa parte do edifício em menos de 10 anos.



Figura 6.2 – Detalhe da estrutura comprometida do IME Prof. José Arapiraca (Salvador-BA)

As fissuras de abertura considerável observadas em várias peças do IME Prof. José Arapiraca, acompanham a malha soldada da armadura e foram provavelmente provocadas por retração hidráulica, a partir de um processo de cura deficiente. Conforme já dito, nesta obra a maior evidência existente de despassivação das armaduras é o próprio processo de corrosão, visível a olho nu, indicando espessuras de carbonatação superiores aos cobrimentos.

Já no edifício do CTRS, a porosidade excessiva da matriz usada na fabricação dos painéis externos inspecionados também é visível, decorrendo daí uma facilidade à penetração de fluidos e as suas respectivas conseqüências deletérias sobre a vida útil das peças. Tal característica fica evidente após a verificação das espessuras de carbonatação nas peças mais expostas ao tempo, em geral próximas a 5mm nos painéis exteriores examinados. Na medida em que os cobrimentos nominais das peças são eqüivalentes a 6mm, os riscos de ocorrência de corrosão das armaduras já existem. As causas desta condições puderam ser comprovadas na medida em que se teve acesso a relatórios de ensaios do CTRS, nos quais constam os traços utilizados em peças como divisórias, paredes, peças para passarelas de pedestres e painéis para muros. Nestes traços o fator água/cimento indicado variava de 0,52 a 0,54. A norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada" não deixa dúvida quanto ao fator água/cimento máximo a ser empregado na produção de peças de argamassa armada, equivalente a 0,45. Importante que se diga que este valor máximo está fundamentado no fato de que a relação água/cimento é o principal parâmetro que determina as propriedades de resistência e durabilidade do concreto usual, em função da porosidade da pasta de cimento hidratada.

As fissuras também observadas em peças do CTRS, as quais "radiografaram" em muitas delas a malha soldada da armadura, foram provavelmente provocadas por retração hidráulica, a partir de um processo de cura deficiente ou incompleto. Através destas aberturas a frente de carbonatação avança pontualmente, possibilitando o surgimento de focos localizados de corrosão de armadura.

Por sua vez, tanto as obras da RENURB (escadarias drenantes, Salvador-BA) como as da EMURB (Cetet-Oeste, São Paulo-SP) podem ser igualmente agrupadas em função da classificação quanto ao nível de danos observados. Apesar da agressividade dos ambientes onde estão localizadas, tanto na obra da EMURB (1993) como nas escadarias drenantes da RENURB (1980), as verificações das espessuras de carbonatação nas peças pré-fabricadas de argamassa armada sempre apresentaram valores inferiores a 1mm. Isso eqüivale a dizer que o cobrimento de argamassa nestas obras é menos poroso e está de

fato protegendo as barras da armadura, mantendo as suas características de promotor da camada passivadora, ainda que com alguma carbonatação superficial, a qual não chega a 1mm após 20 anos — caso das escadarias drenantes da RENURB.

É possível depreender daí, que duas das principais causas da corrosão das armaduras de aço na argamassa armada podem ser a relação água/cimento elevada e os procedimentos deficientes de cura. Esses problemas, no entanto, podem ser equacionados sem a necessidade de se implementar soluções caras, tal e qual prescreve a própria norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada". Aitcin afirma exaustivamente que qualquer concreto com uma relação água/aglomerante superior a 0,5 é um concreto com uma microestrutura muito aberta e que oferece "largas avenidas para a penetração dos agentes agressivos" (AÏTCIN, 1998).

Portanto, não é o marco temporal do ano de 1990, quando foi publicada a norma NBR-11.173 - Projeto e execução de argamassa armada, que estabelece o "divisor de águas" entre obras feitas dentro dos melhores preceitos técnicos ou não. Tomando-se a norma brasileira, reafirma-se aqui que as obras podem e devem necessariamente ser divididas basicamente em:

- Obras executadas segundo a norma - aquelas que, realizadas após a publicação da NBR-11.173 ou que apresentem evidências ou registros documentais da aplicação de seus preceitos;
- Obras executadas fora de norma - em geral aquelas compreendidas no período arbitrado entre 1980 até 1990, quando inexistia o documento normativo, podendo estender-se às obras produzidas posteriormente à publicação da NBR-11.173, as quais apresentem evidências documentadas de não observância aos preceitos ali preconizados.

As características potenciais de elevado desempenho da argamassa armada quando aplicada segundo a configuração prescrita na norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada", podem então ser associadas ao seu baixo fator água/cimento, limitado a 0,45.

Só para que se tenha uma idéia, para um concreto usual com uma relação água/cimento de 0,60, uma profundidade de carbonatação de 15mm é atingida após 15 anos, ao passo que com uma relação 0,45 a mesma profundidade só é alcançada após 100 anos (NEVILLE, 1997).

No entanto, ainda que as matrizes da argamassa armada possam alcançar um nível satisfatório em termos qualitativos, as inspeções feitas às obras demonstram que —por melhor que seja a qualidade da matriz— as mínimas espessuras de cobertura e as disposições construtivas das armaduras praticadas a partir da norma NBR-11.173, por um lado, e a falta de proteção superficial para as peças aparentes empregadas em ambientes agressivos, por outro, apontam para uma necessidade de revisão dos critérios de projeto e execução na norma em vigor, com vistas a um aumento de expectativa de vida útil das estruturas à base de elementos delgados.

CAP. 5 - EMBASAMENTO TEÓRICO

Encontram-se entre os antecedentes que nortearam a elaboração deste trabalho a dissertação de mestrado deste pesquisador, intitulada “Industrialização da construção e argamassa armada; perspectivas de desenvolvimento” (CAMPOS, 1989) e o artigo de Hanai e El Debs escrito em 1994, intitulado “The future of ferrocement in the Civil Engineering Construction; some questions, answers and trends” (HANAI e EL DEBS, 1994), conforme já exposto no Capítulo 4, onde é apresentada a metodologia que orientou a pesquisa.

Essas duas referências bibliográficas guardam entre si o sentido de instigação para o desenvolvimento da presente pesquisa, na medida em que a dissertação de autoria deste pesquisador formulava um quadro promissor para o futuro que até então se projetava para a tecnologia da argamassa armada, negado pela realidade dos fatos que se precipitaram ao longo da década de 1990, cujo significado o artigo de El Debs e Hanai tenta decifrar, indicando possíveis caminhos para a superação dos limites e entraves impostos por esta mesma realidade.

A experiência acumulada no Brasil indicava que era viável a implantação de fábricas de componentes pré-fabricados leves de argamassa armada, seja por iniciativa do poder público ou de empreendedores privados, a baixos custos de investimentos em capital fixo e com produtos de qualidade, como uma prática fundamental, e até certo ponto lógica, para que houvesse uma superação das enormes necessidades sociais até hoje existentes, particularmente na área habitacional (CAMPOS, 1989).

A UTOPIA MODERNA DO “PREFABISMO” NO BRASIL

O “prefabismo”, como expressão que designa a utopia da pré-fabricação, é apresentado numa das mais completas e importantes reflexões feitas sobre o tema no período de reconstrução da Europa que vai, aproximadamente, de 1950 a 1970. Em dois grandes volumes organizados pelo engenheiro de estruturas espanhol, José Antonio Fernández Ordóñez, publica-se em 1973 a obra magistral intitulada “Prefabricación; teoría y práctica”, que ademais do seu rico conteúdo

técnico, traz consigo a idéia e a tentativa de demonstrar que a utopia da Arquitetura Moderna seria colocada em prática através do ‘prefabismo’: “Os grandes arquitetos do futuro não serão os que façam as casas mais belas, senão aqueles que projetem as máquinas de fabricar as casas mais belas, com os mesmos metros quadrados, o mesmo custo, os mesmos materiais e as mesmas instalações que as restantes” (FERNÁNDEZ O., 1973).

Entre os bons autores de “Prefabricación; teoría y práctica”, mereceu um reconhecimento especial na apresentação escrita por Fernández Ordóñez, o jovem engenheiro industrial à época, Julián Salas Serrano, cuja dedicação e entusiasmo tornaram possível concluir a publicação enciclopédica em referência.

Salas, em 1988, durante o curso "Construção industrializada; pré-fabricação" (SALAS, 1988), promovido em São Paulo pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT e Instituto Eduardo Torroja de Madri, o qual teve entre os seus assistentes este pesquisador, afirmava em tom jocoso mais ou menos o seguinte: — A crença na pré-fabricação era tão grande durante os anos 70, que na Espanha alguns opositores chegaram ao ponto de imaginar o dia em que o ditador Francisco Franco seria vítima de um acidente com um grande painel de concreto.

A tecnologia da pré-fabricação leve, da forma como é tratada neste trabalho, tem um enfoque muito mais dirigido ao estudo das propriedades dos materiais do que ao desenvolvimento de componentes e sistemas construtivos. Segundo o conceito apresentado por Hanai, a presente pesquisa trata mais do “hardware” da pré-fabricação à base de elementos delgados de concreto, do que propriamente do “software” ou das aplicações da tecnologia (HANAI, 1992).

No entanto, é importante que se reafirme aqui o fascínio, com um caráter quase utópico, que a experiência com a pré-fabricação leve à base de componentes de argamassa armada exerceu sobre as gerações de jovens arquitetos que tomaram contato com esta tecnologia na década de 1980, a exemplo deste pesquisador. Afinal, aquele poderia ser um modelo tecnológico diferenciado para o desenvolvimento da construção civil, distinto dos processos tão somente importados e adequado à estrutura econômica, social e cultural do

país, com suas realidades regionais, o qual consistia de uma proposta de industrialização da construção à base de componentes leves, como um caminho consolidado e possível àquela altura.

A tecnologia da argamassa armada adquiriu visibilidade na década de 1980, tanto nacional como internacionalmente, principalmente em função do seu elevado desempenho estrutural e das obras a que deu origem, em especial nas mãos do arquiteto João Filgueiras Lima ou "Lelé", como é conhecido. Pode-se dizer que o modelo de pré-fabricação apresentado por João Filgueiras Lima muito tem daquele "prefabismo" que animou a imaginação de um número considerável de arquitetos na Europa, que viram nesta técnica construtiva a realização do sonho dos pioneiros do modernismo.

Segundo Marcelo Ferraz, arquiteto e coordenador editorial do livro recentemente publicado cujo título é "João Filgueiras Lima; Lelé" (FERRAZ, 1999), para além das soluções construtivas pré-fabricadas, empregando alta tecnologia aliada à mais "sofisticada simplicidade ... João Filgueiras Lima talvez seja o arquiteto que mais longe levou as propostas do Movimento Moderno, de fazer uma arquitetura que possa mudar o mundo para melhor".

Certa vez, durante uma conferência que proferiu em 1992 no XIX Congresso Pan-americano de Arquitetos realizado em Montevideu, este pesquisador afirmou que "João Filgueiras Lima ousou projetar a grande arquitetura para os pobres" (CAMPOS, 1992). Uma ousadia social, entre outras tantas boas ousadias técnicas cometidas por Lelé. A propriedade com que Lelé aplicou a argamassa armada em seu projetos, manejando como poucos e com igual destreza arte e técnica, estimulou e segue estimulando gerações de arquitetos a ousar no emprego da pré-fabricação como ferramenta privilegiada para vencer os déficits quantitativos e as carências qualitativas existentes no cenário do ambiente construído das cidades brasileiras.

Um importante depoimento encontra-se também registrado no livro "João Filgueiras Lima; Lelé", onde o arquiteto Lucio Costa explica: "... técnico e artista, [Lelé] surgiu na hora certa: era o elemento que estava faltando para preencher grave lacuna no desenvolvimento da nossa arquitetura. Arquiteto de sensibilidade

artística inata mas fundamentalmente voltado para a nova tecnologia construtiva do 'pré-moldado', enfrenta e resolve de forma racional, econômica e com apurado teor arquitetônico os mais variados e complexos desafios que o mundo social moderno programa e impõe" (COSTA, 1985).

Ainda segundo as palavras de Lucio Costa: "Em Brasília, em Natal e aqui, monta ele próprio instalações para moldagem, fabrico e 'cura' de grandes peças manuseáveis de 'argamassa armada' destinadas a infra-estruturas, arrimos ou equipamentos urbanos, mas principalmente, à construção de escolas pequenas e médias onde a economia, a durabilidade, o impecável acabamento e a beleza se irmanam; escolas objetivando complementar, por toda parte, nas cidades e no campo, esse fabuloso programa dos CIEPS: propiciar 'jogo limpo', com tempo integral —educação e saúde— no começo da vida de *todas* as crianças indistintamente, —o mais é decorrência". Conclui então, definitivamente: "João da Gama Filgueiras Lima, o arquiteto onde arte e tecnologia se encontram e se entrosam, —o *construtor*" (COSTA, 1985).

Em Brasília, Lelé realizou os seus primeiros projetos, enquanto no Rio de Janeiro, dedicou-se à pré-fabricação massiva de escolas durante o governo de Leonel Brizola, em 1984. Recordando este período mais recente, o arquiteto Oscar Niemeyer apresenta a técnica da argamassa armada como uma invenção da criatividade de Lelé (NIEMEYER, 1999) e, em que pese a licença poética utilizada, na medida em que a afirmação do mestre da arquitetura brasileira ignora toda uma rede de pesquisa constituída à volta da tecnologia que chegou em 1979 a Filgueiras Lima pelas mãos do Prof. Frederico Schiel, da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, é legítimo afirmar que a tecnologia da argamassa armada e da pré-fabricação leve no Brasil foi reinventada por Lelé durante a década de 1980.

QUESTIONAMENTO DO MODELO

O período aqui batizado como "Questionamento do modelo", foi marcado pelo lançamento, em 1991, do programa dos CIACs-Centros Integrados de Apoio à Criança do governo federal, durante a chamada "era Collor".



Figura 5.1 - O presidente Fernando Collor acompanhado do governador Leonel Brizola à frente da maquete do primeiro CIAC (1991)

Os CIACs nasceram como uma versão do governo do presidente Collor para os CIEPs que o governador Leonel Brizola implantara anos antes no Rio de Janeiro. Foi Brizola, através do então senador Darcy Ribeiro, quem fez chegar a Fernando Collor a proposta dos CIACs e da utilização da argamassa armada como tecnologia de construção.

A escala do programa dos CIACs, que previa a execução de 5.000 centros entre 1992 e 1995, exigia a implantação de cerca de 20 grandes usinas de produção de pré-fabricados de argamassa armada espalhadas pelo país. Cada CIAC tinha ao redor de 4.000 m² de área construída, reunindo escola, creche, centro médico e ginásio. Os investimentos previstos, conforme divulgado pela imprensa, eram da ordem de 4,5 milhões de dólares.

A inauguração do CIAC "Anísio Teixeira", em Brasília, no dia 28 de fevereiro de 1992, marca o clímax do uso político do programa, assim como o início das crescentes dificuldades para implantá-lo numa escala nacional.

Num trabalho intitulado "A educação básica na imprensa (1992-96): muitos passos, mas, para onde mesmo?", coordenado pela professora Maria Helena de Magalhães Castro, sob encomenda do Programa de Promoção da Reforma Educacional na América Latina (PREAL) financiado pelo BID-Banco Interamericano de Desenvolvimento (CASTRO, 1996), afirma-se que a maior parte das matérias sobre o ensino básico publicadas em 1992, referiam-se particularmente aos CIACs e aos CIEPs, às inaugurações e visitas que as autoridades brasileiras faziam a essas escolas, acompanhadas de dirigentes estrangeiros. No mesmo trabalho diz-se que o tom das matérias era de euforia: "A Itália vai adotar o modelo; os visitantes ficam encantados; Brizola e Collor, lado a lado, no Rio de Janeiro se congratulam. Já o governador Joaquim Roriz amplia a capacidade de produção de argamassa [armada] para construir um CIAC por semana e decreta que 5% da mão-de-obra dessas construções deverão ser de menores carentes" (CASTRO, 1996).

Paralelamente, a imprensa passa a publicar as primeiras denúncias de corrupção no emprego de verbas e na construção dos CIACs. Em março de 1992, o arquiteto João Figueiras Lima e sua equipe abandonam o programa, alegando problemas de natureza política, numa altura em que dezenas de grandes fábricas de argamassa armada já estavam em vias de funcionamento no país. O Dr. Alceni Guerra, titular do ministério da saúde, pasta responsável pela implementação do programa, vê-se obrigado a restabelecer rapidamente a credibilidade técnica do programa frente à opinião pública, convocando para tanto a equipe de professores e especialistas do chamado "Grupo de São Carlos", da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. A proposta inicial do ministério da saúde era de que a Universidade de São Paulo daria o suporte técnico para prosseguimento do programa dos CIACs, tanto sob a forma de auditoria como através de consultoria, o que nunca viria a acontecer.

Além disso, a mesma equipe de professores e especialistas, entre os quais se encontrava este pesquisador, preparou um documento visando atender a uma segunda solicitação feita pelo superintendente do programa do governo federal chamado de “Minha Gente”, Dr. Antônio de Souza Teixeira Júnior, no sentido de que os docentes e pesquisadores envolvidos com a tecnologia da argamassa armada se manifestassem sobre a possibilidade de aplicação intensiva desse material na construção de habitações de interesse social em todo o território nacional, à semelhança do programa de construção dos CIACs.

O documento apresentado em resposta à solicitação, inicialmente, já deixava clara a concepção que os docentes e pesquisadores que lideravam o “Grupo de São Carlos” tinham sobre uma estratégia tecnológica de construção a ser adotada num programa nacional de habitação, a qual deveria levar em conta, não apenas a aplicação da tecnologia da argamassa armada, mas também de outras alternativas tecnológicas disponíveis regionalmente no País (EESC-USP, 1992).

Em síntese, o documento defendia o seguinte:

1. É imperativo que, a partir de uma política habitacional estabelecida, seja definida e implementada uma estratégia de utilização plena dos recursos tecnológicos disponíveis (diversos materiais e técnicas), para que sejam satisfatoriamente alcançadas todas as exigências de qualidade e preço das construções habitacionais.
2. Os preceitos modernos da “industrialização da construção” devem ser aplicados, de modo coerente com o potencial e a capacitação tecnológica do parque industrial existente no Brasil, para se evitar a ocorrência de distorções graves no planejamento do processo produtivo.
3. Em consonância com uma política habitacional, estabelecida por consenso com a participação de representantes de todos os setores da sociedade, as diretrizes técnicas gerais devem ser definidas por uma equipe técnica de alto nível, capaz de liderar o processo de formulação e implementação da estratégia tecnológica.

4. A opção apriorística pela argamassa armada ou qualquer outro material, com o qual se pretenda desenvolver um componente ou sistema construtivo, é um procedimento não recomendado. Pode-se, sim, optar pela argamassa armada como uma alternativa para a execução de componentes e sistemas construtivos, através de propostas identificadas com a industrialização aberta e com as diretrizes de um metaprojeto.

Ainda que o documento não explicitasse uma posição contrária à concepção do programa dos CIACs, claro estava o contraponto manifestado por aqueles que representavam o maior centro de excelência em argamassa armada do país, o “Grupo de São Carlos”, na medida em que desaprovavam a escolha de uma tecnologia única para um programa a ser implantado num país com as dimensões continentais do Brasil.

Já em setembro de 1991, antes mesmo da inauguração do primeiro CIAC, a polêmica a respeito do programa já estava instalada no meio técnico, e as críticas mais consistentes tinham origem entre os próprios especialistas na tecnologia da argamassa armada.

Em matéria publicada na revista “Construção”, em sua edição de 23 de setembro de 1991 (SOUSA, 1991), o professor João Bento de Hanai, da Escola de Engenharia da USP, declarava: “Mesmo que a tecnologia da argamassa armada tenha sido bem divulgada no Brasil nos últimos anos, ela não é familiar à maioria dos profissionais da engenharia e arquitetura. Não que haja grandes dificuldades de assimilação, já que não existe nenhuma misteriosa caixa-preta sobre ela. Persiste isto sim, certa falta de cultura sobre o assunto e, em geral, sobre o tema da construção industrializada”. Essas deficiências, afirmava Hanai, podem implicar num elevado índice de rejeição de componentes, seja por sua qualidade insatisfatória seja pela necessidade de manutenção a curto prazo.

Na mesma matéria, acompanhando a opinião de Hanai, a arquiteta e professora já falecida, Mayumi de Souza Lima, com quem este pesquisador teve a honra de formar equipe para implantar o CEDEC-Centro de Desenvolvimento de Equipamentos Urbanos e Comunitários da EMURB-Empresa Municipal de

Urbanização de São Paulo (1989-1992), declarava: “Preocupa-nos a perspectiva de se produzirem peças em argamassa armada em todo o Brasil, porque esta tecnologia exige um rigoroso controle de produção”. Quase profetizando o que estava por acontecer, a arquiteta conclui avaliando que, caso o projeto fracassasse, o material seria “queimado” nacionalmente, exigindo um longo trabalho para reabilitá-lo (SOUSA, 1991).

Os problemas de natureza política alegados pelo arquiteto João Filgueiras Lima, por ocasião da sua saída e da equipe que comandava no programa dos CIACs, são em parte explicados ainda na mesma matéria assinada pelo jornalista Marcos de Sousa. O preço de US\$ 250,00 por m² de construção dos CIACs, definido inicialmente conforme avaliação da Promon Engenharia, empresa através da qual foi contratado Lelé para a coordenação dos projetos, não era viável segundo as empreiteiras privadas responsáveis pelas fábricas inicialmente implantadas no país. Uma articulação de grandes construtoras e políticos do próprio governo pretendia elevar para US\$ 400,00 por m² o valor de construção dos CIACs. A matéria conclui dizendo: “... há em Brasília quem diga que o objetivo [das pressões] não era exatamente o preço, mas simplesmente inviabilizar os investimentos na área social, desviando-os para setores como energia ou transporte, mais lucrativos para as grandes construtoras”.

Parte destes interesses veio a ecoar também entre os técnicos, alguns deles renomados e explicitamente ligados a grandes empreiteiras. A pressão inicial veio sob a forma de uma manobra para tentar alterar a norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução da argamassa armada”, em 1991, mesmo ano de lançamento do programa dos CIACs. Em meio a uma concorrida reunião marcada para discussão desta possibilidade, e presenciada por este pesquisador, entre outros membros convidados da comissão de estudos da ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas que redigira a norma nacional menos de dois anos antes, pôde-se assistir —após muitas discussões— a uma brilhante defesa do documento normativo, feita pelo professor e também membro daquela comissão de estudos, o Dr. Eng^o Augusto Carlos de Vasconcelos. Vasconcelos pôs fim à discussão na medida em que declarou que para a redação da NBR-11.173, concorreram especialistas de reconhecida experiência e saber no tema estudado,

somando-se a isso o fato da norma em referência ter àquela altura menos de dois anos da sua publicação, dando a entender que eram prematuras e até mesmo levianas as propostas de revisão da norma sugeridas naquele encontro, visto que o documento sequer tivera a oportunidade de ser empregado e testado pelo meio técnico nacional. O discurso do professor Vasconcelos marcou o fim da reunião, aclamado pela imensa maioria dos presentes ao auditório da ABCP-Associação Brasileira de Cimento Portland, ironicamente um edifício projetado por Lelé em peças de argamassa armada.

REVISÃO E RESTABELECIMENTO DE PARADIGMAS

Conforme comentado no Capítulo 3, foi a reflexão consciente dos próprios pesquisadores e especialistas que reconhecidamente dominam os fundamentos tecnológicos relacionados à argamassa armada, à pré-fabricação leve e às estruturas delgadas ou laminares de concreto armado, que proporcionou o ambiente adequado à revisão do estado-da-arte e ao lançamento de perspectivas futuras para as quais apontam o presente trabalho.

O marco inicial deste período, aqui chamado de “Revisão e restabelecimento de paradigmas¹”, na opinião deste pesquisador, reside no artigo de Hanai e El Debs publicado em 1994, várias vezes citado ao longo deste trabalho, intitulado “The future of ferrocement in the Civil Engineering Construction; some questions, answers and trends”. Acompanhando a tendência internacional, o artigo de Hanai e El Debs faz ver que havia de fato fortes e objetivas restrições à tecnologia à época, particularmente no que se referia a durabilidade e custos, o que impedia o desenvolvimento da argamassa armada daquele ponto em diante (HANAI e EL DEBS, 1994).

Com referência à durabilidade, no capítulo final de seu livro “Construções de argamassa armada; fundamentos tecnológicos para projeto e execução” (HANAI, 1992) Hanai já afirmava que, em se tratando da argamassa em si, com

toda a certeza um conjunto maior de informações sobre durabilidade constituiria “o mais poderoso agente definidor do efetivo potencial da tecnologia de estruturas delgadas”. Ou seja, as dúvidas e as restrições ao seu uso seriam eliminadas, bem como novas especificações seriam criadas, estabelecendo-se limites para o emprego das “argamassas normais de cimento portland”, segundo o que prevê atualmente a norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada” (ABNT, 1990), ao mesmo tempo indicando-se a necessidade de desenvolvimento de matrizes cimentícias especiais, de alto desempenho, nas palavras de Hanai.

Ao se analisar os anais do 6th International Symposium on Ferrocement, ocorrido no início de junho de 1998, na University of Michigan (LAMBOT SYMPOSIUM, 1998) é possível verificar que a afirmação feita por Hanai em 1992, era mais do que uma mera opinião pessoal do autor, tal a prioridade que a comunidade científica internacional reunida em torno do ferrocimento, cuja versão nacional é a tecnologia da argamassa armada, dá atualmente ao tratamento do tema da durabilidade.

Entre os temas do encontro, o qual coincidiu com o 150º aniversário da invenção do ferrocimento por Joseph Louis Lambot (1848, patente requerida em 1856), destaca-se:

- A apresentação e discussão da primeira “Norma modelo de ferrocimento”;
- O estado-da-arte do ferrocimento em diferentes regiões do mundo e as perspectivas de futuros progressos;
- Apresentação de recentes estruturas notáveis e aplicações inovadoras do ferrocimento;

¹ Thomas Kuhn define “paradigma” como “realizações que alguma comunidade científica particular reconhece, durante certo tempo, como fundamento para sua prática posterior” (KUHN, 1962).

- Elementos e processos construtivos, pré-fabricados e monolíticos, para habitação empregando o ferrocimento;
- O uso de malhas plásticas reforçadas com fibras;
- O uso de matrizes e fibras naturais;
- Durabilidade;
- Avanços na pesquisa e perspectiva científica para um futuro próximo.

Chamaram a atenção deste pesquisador, pelo menos quatro dos oito tópicos que constituem o temário do simpósio: pré-fabricados, uso de fibras plásticas, uso de fibras naturais e durabilidade. Os tópicos de pré-fabricados e durabilidade, por sua identificação direta com o campo objeto do presente trabalho, mas também os temas relativos às fibras plásticas e às fibras naturais, que apontam para uma tendência em converter o conhecido ferrocimento em um material composto, reforçado com fibras. Tal tendência pôde ser confirmada recentemente, nos anais do sétimo e último “International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites”, realizado em Singapura no ano 2000, o qual traz uma clara indicação em seu próprio nome, quando menciona além da expressão “ferrocimento” o termo “elementos delgados de materiais compostos reforçados”. Este é hoje um tema subjacente e inevitável quando se estuda o desenvolvimento das estruturas laminares, o qual é abordado no capítulo final deste trabalho, onde se fala a respeito das perspectivas futuras para o microconcreto de alto desempenho.

No artigo escrito por Shah e Peled para o 6th International Symposium on Ferrocement, cujo título em inglês é “Advanced in science and technology of ferrocement”, os autores falam sobre as pesquisas de materiais compostos constituídos por matrizes com baixa porosidade, resultando em uma forte ligação entre fibras e matriz, as quais apresentam um alto desempenho e durabilidade (SHAH e PELED, 1998). O artigo apresenta, genericamente, algumas indicações básicas para obtenção de matrizes cimentícias de alto desempenho, com o emprego da sílica ativa e aditivos superplastificantes de alto poder de dispersão, voltadas especificamente para os materiais compostos reforçados com diversos

tipos de fibras. As referências, no entanto, não chegam a apresentar parâmetros para aplicação prática dos conhecimentos obtidos em laboratório, ao contrário do caminho proposto na presente pesquisa, a qual tem como ponto de partida parâmetros originados nas linhas de produção de pré-fabricados leves de argamassa armada de uma usina, tais como consistência e trabalhabilidade requeridas para a matriz de alto desempenho a que se quer chegar.

Em um outro artigo escrito por Paramasivam para o mesmo encontro, intitulado “Recent research and applications of ferrocement in Singapore” (PARAMASIVAM, 1998), o autor fala sobre a aplicação bem sucedida do ferrocimento em peças pré-fabricadas estruturais, destacando a necessidade de transferir os conhecimentos para a indústria, convertendo a pesquisa em aplicações que resultem em benefícios econômicos.

Em seu artigo “High performance ferrocement using stainless steel mesh and high strength mortar”, Nedwell e Nakassa também demonstram a preocupação com a durabilidade, propondo um ferrocimento de alto desempenho, através do emprego de uma malha de aço inoxidável associada a uma matriz de alta resistência (NEDWELL e NAKASSA, 1998). Chegam a descrever em detalhe a forma de obtenção de uma matriz de alta resistência utilizando a sílica ativa, correlacionando esta propriedade com outras vantagens, tais como uma maior durabilidade. Outro ponto positivo do artigo é o fato de que, ao contrário de Shah e Peled, Nedwell e Nakassa medem as consistências das matrizes de alta resistência obtidas. No ensaio de consistência na mesa de espalhamento (flow-table), descrita na MB-2519-Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone – Método de ensaio (ABNT, 1986), os autores chegaram a grandezas que variavam de 225 a 230 mm, ligeiramente abaixo do desejável para uma trabalhabilidade mínima —compatível com as operações de lançamento, adensamento e acabamento que ocorrem na produção seriada de componentes pré-fabricados leves em usina, fixada em $270\text{mm} \pm 5\text{mm}$ na presente pesquisa, a partir da prática corrente utilizada na usina de pré-fabricados da EMURB-Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo, cujo traço foi apresentado no Capítulo 3. Ao final, surpreendentemente, o artigo indica a obtenção de resistências um tanto aquém do que poderia ser esperado, tendo em

vista o emprego de 10% de adição de sílica ativa e 1% de aditivo superplastificante em parte dos corpos-de-prova ensaiados, onde se obteve aos 28 dias uma resistência ao redor de 70 MPa, para um traço de 1:2 em massa com relação água/cimento de 0,40.

Já as restrições relativas aos custos, também indicadas no artigo de Hanai e El Debs publicado em 1994, são expostas em parte no Capítulo 3, na medida em que Mário Nervi, engenheiro e filho de Pier Luigi Nervi, num artigo escrito para o 1st International Symposium on Ferrocement, realizado em 1981, em Bergamo, Itália, revela que a tecnologia do ferrocimento começa a declinar a partir de 1955, atingindo o seu limite crítico em 1960, quando houve a liquidação da SAFCA-Società Anonima Ferro-Cemento Applicazioni, fundamentalmente em consequência da alta incidência do custo da mão-de-obra nos empreendimentos (HANAI, 1992). Conforme já colocado no Capítulo 3, o ferrocimento de Nervi tinha um consumo de cimento de 1000 kg por m³ e taxas de armadura da ordem de 500 kg por m³ (HANAI, 1992), e em que pese a sua pequena espessura característica, chega-se facilmente à dedução de que havia uma componente de custo de mão-de-obra importante no material, referente ao trabalho artesanal dos armadores, numa época em que os salários na Itália já eram bem superiores aos verificados nos primeiros anos do pós-guerra.

A segunda referência referente aos custos, também apresentada no Capítulo 3, consta no livro “Eduardo Torroja; ingeniero” de Fernández Ordóñez e Navarro Vera (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999), onde são indicados os motivos que levaram Félix Candela, outro dos mestres das construções laminares, a abandonar em 1971 esta tipologia estrutural no México, ante a impossibilidade de competir economicamente com outras concepções. Os mesmos autores comentam ainda, a maneira como as construções laminares de concreto, projetadas sobretudo por Torroja, foram desaparecendo na medida em que a vantagem da economia de materiais, em função da pequena espessura das lâminas, foi gradativamente sendo neutralizada pelo aumento do custo da mão-de-obra.

Indo ao encontro destas afirmações, Barberio e Mattone em outro artigo apresentado no 6th International Symposium on Ferrocement, intitulado “Problems and prospects of ferrocement in Italy”, afirmam de forma enfática: “O panorama das experiências internacionais mostram claramente que o potencial do ferrocimento pode ser plenamente explorado somente através da pré-fabricação, talvez como único caminho para alcançar qualidade a baixo custo; este é o objetivo que vem inspirando a maior parte dos projetos de pesquisa conduzidos nos últimos anos” (BARBERIO e MATTONE, 1998). Os mesmos autores justificam-se dizendo que “a pré-fabricação, tão largamente adotada por Nervi na produção de elementos de ferrocimento, é empregada nos dias de hoje, principalmente, na forma de estruturas pesadas de concreto simples ou protendido, que exigem menos mão-de-obra e adotam esquemas estruturais de menor complexidade.

Ora, como se sabe, o grande mérito das pesquisas empreendidas pelo chamado “Grupo de São Carlos” a partir de 1960 foi adequar o ferrocimento às condições da realidade brasileira, reduzindo drasticamente suas taxas de armadura e seu consumo de cimento, conforme comentado no Capítulo 1 deste trabalho, empreendendo assim, passos decisivos para a otimização econômica da tecnologia batizada no Brasil de argamassa armada.

Sendo assim, é preciso esclarecer aqui que as reconhecidas restrições econômicas existentes no meio internacional em torno do ferrocimento foram, até certo ponto, já superadas com o advento da argamassa armada no Brasil, na medida em que já não se trata da configuração do material originalmente concebido por Nervi, embora produzido com os mesmos insumos e projetado à luz de conceitos estruturais semelhantes. Além disso, os avanços no sentido de tornar a argamassa armada mais competitiva economicamente não param por aí, conforme atesta o artigo publicado em 1993 na revista “Téchne” nº 3, escrito por Bentes e Vasconcellos a partir de um desenvolvimento originalmente concebido por Hanai e Campos, onde encontra-se registrada a experiência pioneira implantada na fábrica de componentes e sistemas construtivos do CEDEC-EMURB (BENTES e VASCONCELLOS, 1993). Neste caso, a adição de fibras plásticas de polipropileno às peças de argamassa armada permitiu àquela

empresa municipal de São Paulo dispensar o uso de telas soldadas, substituindo-as por armaduras de fios de aço, o que propiciou uma economia de 40% nos custos de produção daquela unidade de produção, sem qualquer prejuízo à qualidade das peças pré-fabricadas.

Em suma, pode-se dizer que, consoante com as referências presentes no artigo de Hanai e El Debs, publicado em 1994, além das tendências internacionais indicadas nos anais do 6th e do 7th “International Symposium on Ferrocement”, realizados respectivamente em 1998 e 2000, adotou-se como foco principal de estudo neste trabalho a questão da durabilidade, partindo-se então da premissa inicial de que a tecnologia argamassa armada possui características potenciais que tendem a um elevado desempenho.

Por outro lado, com base no estágio atual da tecnologia da argamassa armada no cenário nacional após o advento das fábricas de sistemas e componentes construtivos pré-fabricados empregando este material, implantadas ao longo da década de 80 e início da década de 90, delimitou-se o campo objeto a que deveria estar circunscrita a pesquisa, dirigida à pré-fabricação leve e à construção industrializada.

O desenvolvimento do microconcreto de alto desempenho justifica-se, conforme já afirmado anteriormente no Capítulo 2 deste trabalho, muito mais pela necessidade de conferir durabilidade às estruturas delgadas de concreto, do que propriamente pela busca de altas resistências à compressão.

Parte-se da hipótese de que o desenvolvimento de um microconcreto de última geração, à luz de uma analogia direta com a tecnologia do concreto de alto desempenho, produzirá um material identicamente de alto desempenho, o qual não só viabilizará as melhores expectativas que se tinha para com a tecnologia da argamassa armada, respondendo definitivamente às indagações existentes sobre as expectativas de sua vida útil, bem como possibilitando uma quebra de paradigmas e, sobretudo, de falsos paradigmas existentes à volta do passado recente da tecnologia, os quais acabaram por arrefecer momentaneamente as perspectivas para o seu desenvolvimento.

Neste sentido, outra das principais referências bibliográficas adotadas foi o livro do Prof. Pierre-Claude Aïtcin, da Universidade de Sherbrooke (Canadá), publicado em 1998, intitulado "High-performance concrete" (AÏTCIN, 1998), em cuja tradução para o português² —feita pelo Prof. Dr. Geraldo Gomes Serra— este pesquisador teve a oportunidade de atuar como revisor. Esta é na atualidade, muito provavelmente, a mais completa publicação sobre concreto de alto desempenho escrita em língua portuguesa.

O livro do Prof. Aïtcin, juntamente com outros dois títulos obrigatórios: "Concreto: estrutura, propriedades e materiais" de Mehta e Monteiro (São Paulo, PINI, 1993) e "Propriedades do Concreto" de Neville (São Paulo, PINI, 1997), conformam a base para a conceituação geral e a realização dos ensaios.

A assistência ao painel realizado sob a coordenação do ACI-American Concrete Institute durante o 40º Congresso Brasileiro do Concreto, realizado no Rio de Janeiro no mês de agosto de 1998, sob os auspícios do IBRACON-Instituto Brasileiro do Concreto, além da posterior leitura de alguns dos trabalhos apresentados, também foi de grande valia para a verificação de dados experimentais obtidos em pesquisas sobre CAD realizadas no país e no exterior.

Neste mesmo período foi traduzido por este pesquisador o artigo "Innovative applications of superplasticizers for producing high-performance concrete" de V. Mohan Malhotra, o qual também consta dos Anais do 40º Congresso Brasileiro do Concreto. Posteriormente a tradução foi publicada na revista "Téchne" (set/out - nº36, São Paulo, PINI, 1998) sob o título "Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho".

O artigo e referência demonstra a forma como os superplastificantes vêm contribuindo para o desenvolvimento de concretos e argamassas inovadoras para aplicações específicas, descrevendo de forma muito clara os efeitos do seu uso como ingrediente essencial para os concretos de alto desempenho e alta

² AÏTCIN, P-C. Concreto de alto desempenho. Pierre-Claude Aïtcin; tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000

resistência, segundo aquele autor. Esses tipos de concreto estão sendo usados progressivamente em estruturas para durar cerca de 100 anos. As estruturas típicas que empregam esse tipo de concreto são grandes pontes expostas a condições ambientais severas e plataformas petrolíferas marítimas de concreto. Os concretos para essas estruturas empregam adições de sílica ativa e altas dosagens de superplastificantes, de modo a se obter altíssimas resistências e durabilidades. Os exemplos apresentados no trabalho descrevem os resultados de pesquisas em laboratório que lidaram com o concreto de alto desempenho e o uso desse tipo de concreto em estruturas correntes.

Além do artigo escrito por V. Mohan Malhotra, empregou-se para a verificação de dados experimentais obtidos em pesquisas sobre concreto de alto desempenho realizadas no país e no exterior, alguns outros trabalhos publicados nos anais dos seguintes encontros:

- 5º Congresso Brasileiro do Cimento, realizado em São Paulo de 8 a 12 de Novembro de 1998, sob os auspícios da Associação Brasileira de Cimento Portland;
- 2ª Conferência Internacional sobre CAD-Concreto de Alto Desempenho, realizada em Gramado-RS, em meados de 1999, sob a coordenação do ACI-American Concrete Institute; e
- CONPAT 99 - Congresso de Patologia, realizado em Outubro de 1999, na cidade de Montevideu (Uruguai).

Além das referências bibliográficas, outras referências não bibliográficas também foram consideradas para o desenvolvimento da presente pesquisa, tais como depoimentos e entrevistas concedidos por reconhecidos especialistas no tema, como o Prof. Dr. João Bento de Hanai, o Prof. Dr. Jefferson Libório e o Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs, da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, além do Dr. Engº Carlos Eduardo de Siqueira Tango, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. As entrevistas programadas visaram captar as tendências atuais nas linhas de pesquisas voltadas para o campo de estudo e verificar quais os projetos de pesquisa em andamento.

CAP. 6 – BASE EMPÍRICA

Conforme já dito nos capítulos iniciais, interessa neste trabalho, sobretudo, verificar a procedência e o mérito dos questionamentos de ordem tecnológica feitos à argamassa armada durante a década de 1990, na medida em que tais questionamentos, ainda que difusos e por vezes sem fundamento, representaram um forte desestímulo à pesquisa acadêmica e à aplicação da tecnologia. Verificar também se tudo aquilo que se construiu sob a designação “argamassa armada” seguiu um mesmo conjunto de critérios técnicos, especialmente após a publicação da norma NBR-11.173 de "Projeto e execução de argamassa armada".

Para isso, foi necessário aprofundar as informações sobre patologias surgidas entre o conjunto das obras executadas após 1980, adotado neste trabalho como marco temporal do início do período de maior difusão e aplicação da tecnologia no país, inspecionando-as e buscando compreender qual a origem destas patologias, visando melhor caracterizar a tecnologia nos dias de hoje e estabelecer um referencial sobre a sua evolução recente no Brasil.

Por sua vez, com a realização de estudos de dosagem para obtenção de uma matriz de microconcreto de alto desempenho, denominação proposta para uma nova geração de matrizes de argamassa armada, numa analogia direta com o concreto de alto desempenho, espera-se restabelecer alguns paradigmas a respeito das estruturas delgadas de concreto armado, como forma de romper uma imagem negativa que se criou à volta do passado recente de algumas obras associadas à designação "argamassa armada", cujo efeito foi arrefecer momentaneamente as perspectivas para o seu desenvolvimento.

Através da interpretação dos resultados de ensaios de resistência à compressão e da análise petrográfica de amostras destas matrizes de microconcreto, procura-se a seguir demonstrar qualitativamente as propriedades de elevado desempenho do material resultante destas novas configurações, particularmente quanto à durabilidade.

A descrição detalhada das inspeções e dos ensaios realizados, bem como as análises e considerações daí decorrentes são expostas na seqüência.

INSPEÇÕES TÉCNICAS

No início de 1998 foi desenvolvida a metodologia para inspeção das obras executadas com pré-fabricados de argamassa armada, imprescindível ao início desta etapa dos levantamentos de campo.

Nas inspeções foram observadas as condições gerais das obras selecionadas, no que se refere à fissuração, corrosão de armaduras, propriedades físicas e químicas e resíduos depositados.

Inicialmente, adotou-se como base a metodologia empregada pelo Prof. Dr. Jefferson Libório, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, na inspeção técnica realizada na cobertura do Terminal Rodoviário “Rita Maria” (Florianópolis-SC), em setembro de 1986 (LIBÓRIO, 1986).

Posteriormente, com a colaboração do Dr. Eng^o Carlos Eduardo de Siqueira Tango, do Agrupamento de Materiais de Construção Civil do IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas, aprimorou-se esta metodologia através da incorporação de procedimentos de inspeção usualmente empregados pelo Instituto em obras de concreto convencional.

Tomando-se então como referência a norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada”, publicada em 1990, as obras foram divididas basicamente em dois grupos, a saber:

- I. Obras executadas segundo a norma - aquelas que, realizadas após a publicação da NBR-11.173, apresentavam evidências ou registros documentais de sua aplicação;
- II. Obras executadas fora de norma - aquelas compreendidas no período arbitrado entre 1980 até 1990, onde obviamente inexistia o documento normativo, podendo estender-se às obras produzidas posteriormente à publicação da NBR-11.173, as quais apresentassem evidências documentais de não observância aos preceitos ali preconizados.

Após inspeções preliminares, as obras selecionadas para aplicação da metodologia e realização das análises comparativas foram as seguintes (em ordem cronológica de realização das inspeções):

- CETET-Oeste, edifício localizado no bairro da Barra Funda (São Paulo-SP, 1993)
- CTRS-Centro Tecnológico da Rede Sarah (Salvador-BA, 1994)
- Instituto Municipal de Educação Prof. José Arapiraca, localizado no bairro da Boca do Rio (Salvador, 1989)
- Escadarias drenantes localizadas ao longo da Avenida Vale das Pedrinhas (Salvador, 1980)

A metodologia passou a ser aplicada inicialmente no segundo semestre de 1998 no CETET-Oeste, em São Paulo, e posteriormente, no início de 1999, foram inspecionadas as obras existentes em Salvador-BA, as quais conformam o mais representativo parque construído com a tecnologia da argamassa armada no país, executado ao longo de três períodos distintos: 1980, 1987 e 1993 até a atualidade.

As inspeções em Salvador-BA foram feitas com a colaboração da Eng^a Célia Martins Neves, do CEPED-Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia, que funcionou como sede das atividades planejadas, na medida em que a instituição colocou à disposição deste pesquisador, tanto as instalações do LEC-Laboratório de Engenharia Civil como o pessoal técnico para apoiar os trabalhos de campo.

A metodologia empregada para a inspeção e análise das condições gerais das obras selecionadas foi sempre a mesma, quer para as obras de São Paulo quer para as obras de Salvador.

Os procedimentos gerais de inspeção utilizados incluíram:

- mapeamento e medição de abertura de fissuras;
- levantamento de focos de deterioração;
- avaliação da espessura de carbonatação nas peças, através da aplicação de solução de fenolftaleína em pontos predeterminados.

Os equipamentos e materiais utilizados nas inspeções, custeados parcialmente com recursos da FAPESP-Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, foram os seguintes:

- Régua comparadora de fissuras mais lupa de aumento;
- Talhadeira fina de aço mais marreta;
- Paquímetro;
- Solução de fenolftaleína;
- Câmera fotográfica;
- Invólucros para coleta eventual de material para análises químicas em laboratório;
- Mapas e planilhas para levantamento (tabela 6.2) e indicação gráfica de fissuras e focos de deterioração; e
- Projeto (módulo-padrão das obras pré-fabricadas).

A classificação dos níveis de danos empregada baseou-se nos critérios estabelecidos no Boletim 162 CEB (TANGO, 2001), a saber:

Tabela 6.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE DANOS

ASPECTOS VISUAIS	Níveis de dano (entre parêntesis, classificação original do CEB)					
	I (sem classificação CEB)	II (A)	III (B)	IV (C)	V (D e E)	
Alteração de cor	Não aparente	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão
Fissuração	Não aparente	longitudinal	longitudinal + estribos	generalizada	generalizada	generalizada
Destacamento do cobrimento	Não aparente	—	pouco	generalizado	generalizado	generalizado
Redução seção de armadura	—	—	5%	10%	25%	Estribos seccionados
Flechas (deformação)	—	—	—	—	possíveis	visíveis

Obs: O nível I destina-se às obras sem problemas detectáveis a olho nu; o nível V é considerado inaceitável.

Tabela 6.2 - PLANILHA PARA INSPEÇÕES DE OBRAS

Projeto: DA ARGAMASSA ARMADA AO MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO						
Obra inspecionada:						
Ano de fabricação/montagem:				Procedência:		
Ambiente (salinidade do ar, umidade relativa, perfil das temperaturas, zona industrial-poluição)						
a) INSPEÇÃO VISUAL PRELIMINAR (descrição sucinta das anomalias verificadas e fotografias)						
b) CLASSIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE DANOS						
Trecho	Exame visual					Classificação de I a V
APÊNDICE – Classificação segundo o boletim 162-CEB						
ASPECTOS VISUAIS	Níveis de dano (entre parêntesis, classificação original do CEB)					
	I (sem classificação CEB)	II (A)	III (B)	IV (C)	V (D e E)	
Alteração de cor	Não aparente	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão	Manchas corrosão
Fissuração	Não aparente	longitudinal	longitudinal + estribos	generalizada	generalizada	generalizada
Destacamento do cobrimento	Não aparente	—	pouco	generalizado	generalizado	generalizado
Redução seção de armadura	—	—	5%	10%	25%	Estribos seccionados
Flechas (deformação)	—	—	—	—	possíveis	visíveis

Tabela 6.2 - PLANILHA PARA INSPEÇÕES DE OBRAS (continuação)

c) PONTOS DE AMOSTRAGEM E ANÁLISES			
Ponto	Espessura de cobrimento (mm)	Profundidade de carbonatação (mm)	Coleta de material (sim/não)

d) EXAME VISUAL DE FISSURAS		
Peça	Direções (Long/Transv/Inclin)	Aberturas máximas (mm)

e) EXAME VISUAL DE FISSURAS

Tabela 6.2 – PLANILHA PARA INSPEÇÕES DE OBRAS (continuação)

f) INSPEÇÕES TÉCNICAS: AMOSTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO		
<ul style="list-style-type: none"> • espessura de cobrimento • profundidade de carbonatação • teor de cloretos monitoramento do ambiente (salinidade do ar, unidade relativa, perfil da temperaturas, zona industrial) <p><u>Observação importante:</u></p> <p>As amostras e as determinações serão orientadas para pontos onde o concreto encontre-se íntegro.</p>		
<p>A classificação será feita tomando como base a obra em sua totalidade ou partes representativas do todo, da seguinte forma:</p>		
UNIDADE	EXAME VISUAL	CLASSIFICAÇÃO
MÓDULO 1		I a V em algarismos romanos
<p>Onde:</p> <ul style="list-style-type: none"> I. módulo sem problemas detectáveis a olho nú II. nível A III. nível B IV. nível C V. nível D e E 		

PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO

As atividades de inspeção seguiram o seguinte roteiro:

- a) elaboração de croquis da obra a ser inspecionada;
- b) levantamento do histórico da obra, compreendendo: data de fabricação, data de montagem, procedência dos componentes, características do projeto (resistência mecânica, disposição de armadura das peças-tipo mais importantes, espessuras de cobrimento) etc.;
- c) inspeção visual preliminar;
- d) descrição sucinta de patologias e focos de deterioração, com registro fotográfico;
- e) classificação segundo a Tabela 6.1 (base: Boletim 162 - CEB).

A classificação geral foi feita tomando como base a obra em sua totalidade ou partes representativas do todo, na medida em que são obras modulares e executadas com peças de fabricação seriada.

Os procedimentos específicos adotados nas inspeções técnicas das obras selecionadas consistiam basicamente em:

a) Determinação da espessura de cobrimento

- expor as armaduras e medir diretamente a espessura de cobrimento com paquímetro
- posição dos pontos: aleatória
- valor mínimo e valor máximo apurado

b) Exame visual das armaduras

- após expor a armadura, verificar eventuais sinais de corrosão e suas características (concentrada ou em forma de manchas)

c) Determinação da profundidade de perda de alcalinidade

- abertura do concreto para exposição das armaduras em pontos predeterminados, visando inicialmente medir a espessura de cobrimento
- posteriormente, pulverizar nas aberturas solução de fenolftaleína, medindo diretamente a espessura de carbonatação: região incolor (onde o pH é inferior a 8,3)
- a ausência de carbonatação é indicada pela cor violeta

d) Exame visual de fissuras

- após verificação das regiões da obra que apresentam concentração de fissuras, indicar as características e direção das mesmas (mapeamento)
- verificar as aberturas das fissuras através com o auxílio de régua comparadora e lupa

Cumpre esclarecer que as armaduras são passivadas ou naturalmente protegidas da corrosão no ambiente alcalino da pasta de cimento, podendo corroer-se, principalmente, em decorrência da carbonatação da matriz e da presença de cloretos na mesma.

Quanto à carbonatação, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, um dos componentes da pasta de cimento, e responsável pelo pH alcalino, ao se carbonatar ou reagir com o CO_2 gasoso do ar, forma o CaCO_3 . Conforme Neville (NEVILLE, 1997), a importância da carbonatação com relação à durabilidade é o fato de que ela reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento, despassivando a armadura. A proteção das armaduras depende diretamente da camada passivadora decorrente da matriz à sua volta, camada esta que se solubiliza quando a matriz passa a apresentar um baixo pH, abrindo caminho para a corrosão das armaduras. Por isso é fundamental conhecer a profundidade de carbonatação e, particularmente, saber se a frente de carbonatação está próxima das armaduras. O avanço da frente de carbonatação vai ser maior ou menor dependendo de vários fatores, dentre eles a permeabilidade do sistema de poros do concreto ou da argamassa, assim como a existência de fissuras, e condições ambientais.

Com a presença de cloretos, a corrosão da armadura também pode acontecer, pois estes íons podem promover a solubilização da camada passivadora até mesmo em ambiente alcalino. Os cloretos podem estar presentes na pasta de cimento em decorrência de sua penetração no interior do concreto ou argamassa endurecidos, ou por serem trazidos pelos materiais constituintes da mistura.

AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Entre as observações a que se pôde chegar após a inspeção de cada um dos edifícios ou equipamentos examinados, destacam-se:

I - Cetet-Oeste (São Paulo)

Procedência: Obra fabricada e montada pela EMURB-Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo, em 1993.

Características principais: Edifício escolar térreo, constituído por estrutura reticulada de pilares e vigas pré-fabricados de argamassa armada, coberto e fechado por lajes e painéis pré-fabricados do mesmo material. A espessura média das peças pré-fabricadas é de 20mm.

Ambiente: Zona urbana e industrial, atmosfera contaminada por líquidos e gases agressivos, umidade relativa do ar variável de média a alta.

Inspeção visual preliminar: Obra não apresenta defeitos generalizados, mas problemas isolados, alguns deles provocados por fatores alheios à tecnologia em foco. As espessuras de carbonatação (sensibilidade à solução de fenolftaleína) nas peças mais expostas, vigas de cobertura, não chegam a 1mm.

Classificação dos níveis de danos: nível I (tabela 1), tendo sido detectados somente problemas isolados, apesar da agressividade do ambiente e da total falta de manutenção do edifício.

II - CTRS-Centro Tecnológico da Rede Sarah

Procedência: Obra fabricada e montada pelo próprio CTRS, com projeto e coordenação do Arq. João Filgueiras Lima, em 1994.

Características principais: Edifício industrial térreo (pé-direito duplo) com mezanino, constituído por estrutura reticulada de pilares e vigas metálicos, coberto por telhas metálicas, tendo lajes de piso (mezanino) e painéis de fechamento executados em argamassa armada. A espessura média das peças pré-fabricadas de argamassa armada é de 20mm.

Ambiente: Zona urbana com atmosfera marinha e umidade relativa do ar média.

Inspeção visual preliminar: Obra não apresenta manifestações patológicas generalizadas evidentes em suas peças pré-fabricadas de argamassa armada (lajes e painéis de fechamento). Por outro lado, foram identificados vários pontos de retrabalho, estucamento e reparos localizados feitos com adesivos poliméricos. Há fissuras de pequena abertura (0,1mm) em várias peças, acompanhando a malha soldada da armadura, provavelmente provocadas por retração hidráulica. A porosidade da matriz empregada está acima do desejável, caso seja considerada a facilidade de penetração de fluidos e as suas conseqüências sobre a vida útil das peças. Tal característica fica evidente após a verificação das espessuras de carbonatação (sensibilidade à solução de fenolftaleína) nas peças mais expostas ao tempo, em geral chegando a 5mm nos painéis exteriores examinados (figura 6.1).

Classificação dos níveis de danos: nível I (tabela 6.1), tendo sido detectados somente problemas isolados, apesar da agressividade do ambiente.

III - Instituto Municipal de Educação Prof. José Arapiraca

Procedência: Obra fabricada e montada pela FAEC-Fábrica de Equipamentos Comunitários de Salvador, em 1989.

Características principais: Edifício escolar térreo, constituído por estrutura reticulada de pilares e vigas pré-fabricadas de argamassa armada, coberto e fechado por lajes e painéis pré-fabricados do mesmo material. A espessura média das peças pré-fabricadas é de 20mm.

Ambiente: Zona urbana com atmosfera marinha, sujeita a névoa salina constante.



Figura 6.1 – Espessura de carbonatação em peça do CTRS (Salvador-BA)

Inspecção visual preliminar: As peças, de uma maneira geral, apresentam fissuras de abertura considerável (0,5mm) acompanhando a malha soldada da armadura, provavelmente provocadas por retração hidráulica, ou seja, cura deficiente. Particularmente na fachada sul do edifício, mais submetida ao vento marinho dominante na região, os elementos pré-fabricados estavam sendo desmontados por ocasião da inspeção, no mês de fevereiro de 99, tendo em vista diversas peças estarem condenadas do ponto de vista estrutural. Não foram verificadas as espessuras de carbonatação, tendo em conta as evidências de despassivação já existentes, visíveis a olho nu.

Classificação dos níveis de danos: nível V (nível E do CEB), tendo sido detectada ruína parcial da obra, em seu lado sul (figura 6.2).

IV - Escadarias Drenantes

Procedência: Obra fabricada e montada pela RENURB-Companhia de Renovação Urbana de Salvador, em 1980.

Características principais: Escadarias constituindo ao mesmo tempo galerias de pequenas dimensões, visando a drenagem superficial das águas de chuva em assentamentos habitacionais precários. O modelo projetado é formado por módulos pré-fabricados de argamassa armada, dentro dos quais circulam as águas, encaixados entre si através de uniões tipo “ponta-e-bolsa” e cobertos por placas e degraus pré-moldados de concreto convencional. Os módulos pré-moldados têm massa equivalente a cerca de 50 kg, o que permite o transporte e montagem manuais, mesmo em estreitas vielas e encostas mais íngremes. A espessura média das peças é de 25mm. A finalidade principal das escadarias é possibilitar a drenagem superficial das águas de chuva em assentamentos precários localizados em encostas, os quais venham a constituir áreas de risco iminente de deslizamentos.

Ambiente: Zona urbana densamente ocupada, onde os agentes agressivos mais importantes passam a ser as águas servidas conduzidas para o interior das galerias, através de ligações domiciliares de esgoto. Trata-se também de uma alternativa para eliminar os esgotos a céu aberto.

Inspeção visual preliminar: Obra apresenta-se totalmente destruída, tanto pelo uso como pela manutenção inadequados. Por ocasião da inspeção, no mês de fevereiro do ano em curso, a Prefeitura de Salvador encontrava-se no assentamento realizando obras de instalação de tronco coletores e ligações domiciliares de esgoto.

Classificação dos níveis de danos: Não se aplica a classificação proposta, tendo em vista o nível de destruição em que se encontram os equipamentos. Todavia foram realizadas verificações das espessuras de carbonatação nas peças pré-fabricadas de argamassa armada, tendo as mesmas apresentado valores sempre inferiores a 1mm.

CONCLUSÕES PARCIAIS

No caso do IME Prof. José Arapiraca, cujas peças de argamassa armada foram fabricadas pela FAEC (1989), a ruína parcial da obra em seu quadrante sul demonstra que a agressividade da névoa salina, sempre presente no local, combinada com uma matriz muito porosa e um alto índice de fissuração, produziram as circunstâncias mais do que propícias para um processo acelerado de deterioração, o qual culminou com a condenação de boa parte do edifício em menos de 10 anos.



Figura 6.2 – Detalhe da estrutura comprometida do IME Prof. José Arapiraca (Salvador-BA)

As fissuras de abertura considerável observadas em várias peças do IME Prof. José Arapiraca, acompanham a malha soldada da armadura e foram provavelmente provocadas por retração hidráulica, a partir de um processo de cura deficiente. Conforme já dito, nesta obra a maior evidência existente de despassivação das armaduras é o próprio processo de corrosão, visível a olho nu, indicando espessuras de carbonatação superiores aos cobrimentos.

Já no edifício do CTRS, a porosidade excessiva da matriz usada na fabricação dos painéis externos inspecionados também é visível, decorrendo daí uma facilidade à penetração de fluidos e as suas respectivas conseqüências deletérias sobre a vida útil das peças. Tal característica fica evidente após a verificação das espessuras de carbonatação nas peças mais expostas ao tempo, em geral próximas a 5mm nos painéis exteriores examinados. Na medida em que os cobrimentos nominais das peças são eqüivalentes a 6mm, os riscos de ocorrência de corrosão das armaduras já existem. As causas desta condições puderam ser comprovadas na medida em que se teve acesso a relatórios de ensaios do CTRS, nos quais constam os traços utilizados em peças como divisórias, paredes, peças para passarelas de pedestres e painéis para muros. Nestes traços o fator água/cimento indicado variava de 0,52 a 0,54. A norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada" não deixa dúvida quanto ao fator água/cimento máximo a ser empregado na produção de peças de argamassa armada, equivalente a 0,45. Importante que se diga que este valor máximo está fundamentado no fato de que a relação água/cimento é o principal parâmetro que determina as propriedades de resistência e durabilidade do concreto usual, em função da porosidade da pasta de cimento hidratada.

As fissuras também observadas em peças do CTRS, as quais "radiografaram" em muitas delas a malha soldada da armadura, foram provavelmente provocadas por retração hidráulica, a partir de um processo de cura deficiente ou incompleto. Através destas aberturas a frente de carbonatação avança pontualmente, possibilitando o surgimento de focos localizados de corrosão de armadura.

Por sua vez, tanto as obras da RENURB (escadarias drenantes, Salvador-BA) como as da EMURB (Cetet-Oeste, São Paulo-SP) podem ser igualmente agrupadas em função da classificação quanto ao nível de danos observados. Apesar da agressividade dos ambientes onde estão localizadas, tanto na obra da EMURB (1993) como nas escadarias drenantes da RENURB (1980), as verificações das espessuras de carbonatação nas peças pré-fabricadas de argamassa armada sempre apresentaram valores inferiores a 1mm. Isso eqüivale a dizer que o cobrimento de argamassa nestas obras é menos poroso e está de

fato protegendo as barras da armadura, mantendo as suas características de promotor da camada passivadora, ainda que com alguma carbonatação superficial, a qual não chega a 1mm após 20 anos — caso das escadarias drenantes da RENURB.

É possível depreender daí, que duas das principais causas da corrosão das armaduras de aço na argamassa armada podem ser a relação água/cimento elevada e os procedimentos deficientes de cura. Esses problemas, no entanto, podem ser equacionados sem a necessidade de se implementar soluções caras, tal e qual prescreve a própria norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada". Aitcin afirma exaustivamente que qualquer concreto com uma relação água/aglomerante superior a 0,5 é um concreto com uma microestrutura muito aberta e que oferece "largas avenidas para a penetração dos agentes agressivos" (AÏTCIN, 1998).

Portanto, não é o marco temporal do ano de 1990, quando foi publicada a norma NBR-11.173 - Projeto e execução de argamassa armada, que estabelece o "divisor de águas" entre obras feitas dentro dos melhores preceitos técnicos ou não. Tomando-se a norma brasileira, reafirma-se aqui que as obras podem e devem necessariamente ser divididas basicamente em:

- Obras executadas segundo a norma - aquelas que, realizadas após a publicação da NBR-11.173 ou que apresentem evidências ou registros documentais da aplicação de seus preceitos;
- Obras executadas fora de norma - em geral aquelas compreendidas no período arbitrado entre 1980 até 1990, quando inexistia o documento normativo, podendo estender-se às obras produzidas posteriormente à publicação da NBR-11.173, as quais apresentem evidências documentadas de não observância aos preceitos ali preconizados.

As características potenciais de elevado desempenho da argamassa armada quando aplicada segundo a configuração prescrita na norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada", podem então ser associadas ao seu baixo fator água/cimento, limitado a 0,45.

Só para que se tenha uma idéia, para um concreto usual com uma relação água/cimento de 0,60, uma profundidade de carbonatação de 15mm é atingida após 15 anos, ao passo que com uma relação 0,45 a mesma profundidade só é alcançada após 100 anos (NEVILLE, 1997).

No entanto, ainda que as matrizes da argamassa armada possam alcançar um nível satisfatório em termos qualitativos, as inspeções feitas às obras demonstram que —por melhor que seja a qualidade da matriz— as mínimas espessuras de cobertura e as disposições construtivas das armaduras praticadas a partir da norma NBR-11.173, por um lado, e a falta de proteção superficial para as peças aparentes empregadas em ambientes agressivos, por outro, apontam para uma necessidade de revisão dos critérios de projeto e execução na norma em vigor, com vistas a um aumento de expectativa de vida útil das estruturas à base de elementos delgados.

Na oportunidade em que foram realizadas as inspeções em Salvador-BA não foi possível entrevistar o Arq. João Filgueiras Lima, conforme estava previsto, uma vez que o profissional recém se desligara do CTRS-Centro de Tecnologia da Rede de Hospitais "Sarah Kubitschek" de doenças do aparelho locomotor, até então por ele coordenado.

A fonte não-bibliográfica em referência pôde, por sorte, ser suprida através da excelente entrevista realizada com o arquiteto Filgueiras Lima, poucas semanas antes de seu desligamento do CTRS, pelo jornalista Marcos de Sousa, e publicada na Revista AU-Arquitetura e Urbanismo da editora PINI (nº 82 - Fevereiro/Março). Além disso, vários dos gerentes dos diversos setores do CTRS forneceram todas as informações técnicas de que se necessitava para avaliar o atual estágio de desenvolvimento da tecnologia do argamassa armada, da forma como ali é aplicada.

Cumprе ressaltar que Filgueiras Lima, além de ter recebido o 1º prêmio da Bienal Ibero-americana de Arquitetura e Engenharia Civil —realizada em Madri em 1998, sendo vencedor o projeto do Hospital "Sarah" de Salvador, onde Lelé utilizou largamente a argamassa armada— foi indicado no ano 2000 para ser um dos representantes do Brasil na Bienal de Arquitetura de Veneza. Na 4ª Bienal de Arquitetura de São Paulo, ocorrida em fevereiro do mesmo ano, um grande espaço também foi dedicado à obra de João Filgueiras Lima.

Finalmente, em maio de 1998, este pesquisador também teve o grande privilégio de estar entre os assistentes de uma palestra proferida no Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", em Madri, pelo ilustre engenheiro de estruturas espanhol, Dr. José Antonio Fernández Ordóñez, quem à época estava concluindo o livro intitulado "Eduardo Torroja Miret, ingeniero, engineer", publicado em 1999 (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999), cerca de um ano antes do seu falecimento. Tanto a palestra, como posteriormente o livro de Fernández Ordóñez, escrito em co-autoria com Navarro Vera, deram um novo alento às convicções que impulsionaram o início desta pesquisa.

CAP. 7 – ESTUDOS DE DOSAGEM: PREMISSAS

Conforme já exposto no capítulo 3, como parte dos estudos de dosagem e ensaios de resistência à compressão que foram realizados no âmbito deste trabalho, buscou-se inicialmente demonstrar parte das características potenciais de alta resistência da matriz da argamassa armada produzida segundo a norma NBR-11.173, através da Família de TRAÇOS I (referência EMURB), conforme apresenta-se na tabela 2.1 e no gráfico 2.1 daquele capítulo.

Para tanto foi reproduzido o traço da matriz da argamassa armada empregada pela fábrica da EMURB no início dos anos 90 e, embora a resistência à compressão não seja o único parâmetro a ser considerado, o fato é que a matriz da argamassa armada, na configuração em que esta se apresenta na NBR-11.173, originalmente utilizada na planta de produção da EMURB (1989-1992), alcançou uma resistência à compressão aos 28 dias de 57 MPa, para um fator água/cimento de 0,413, podendo ser classificada como um concreto de alto desempenho classe I (resistência à compressão entre 50 e 75 MPa), conforme a classificação de Aitcin (AİTCIN, 1998) apresentada na tabela 3.3 do capítulo 3.

No entanto, dentro do caráter de inovação tecnológica que deve ter o presente trabalho, buscou-se ir mais adiante, consolidando-se aquilo que aqui se definiu como a matriz de um microconcreto armado de última geração, com características distintas tanto do "ferrocimento" de Nervi, como da argamassa armada aperfeiçoada pelo Grupo de São Carlos até meados da década de 90. Esta matriz de última geração deve necessariamente possuir características de elevado desempenho que redefinam o perfil tecnológico do material, como um concreto de alto desempenho a ser utilizado em peças de pequena espessura, exigindo portanto o conhecimento de suas características peculiares quanto às propriedades dos materiais constituintes, comportamento estrutural, técnicas de execução e possibilidades de aplicação dentro de critérios de adequação tecnológica.

Para isso, além de reproduzir a Família de TRAÇOS I (referência EMURB), projetou-se uma segunda Família de TRAÇOS II, incorporando um aditivo superplastificante à matriz do microconcreto como redutor de água, de forma a

baixar o consumo de cimento, aumentar a resistência e melhorar as características da microestrutura do material no tocante à sua durabilidade.

Finalmente, foi projetada também uma Família de TRAÇOS III, onde além do aditivo superplastificante, incorporou-se a adição de sílica ativa ao microconcreto, de modo a se superar largamente as resistências características habituais dos microconcretos obtidos na Família de TRAÇOS I, buscando conferir características excepcionais à microestrutura do material resultante, quanto à sua resistência e exigências relativas à durabilidade.

Qual a dosagem e os materiais constituintes utilizados para se chegar às matrizes destes microconcretos de alto desempenho? Como atingir a mínima relação água/aglomerante possível, mantendo-se uma trabalhabilidade compatível com as operações de lançamento, adensamento e acabamento, particularmente, na produção seriada de componentes pré-fabricados leves? Neste capítulo são apresentadas cada uma das etapas que precederam à execução dos ensaios, segundo a metodologia adotada, como forma de fundamentar as decisões tomadas no decorrer da execução dos ensaios realizados.

MICROESTRUTURA DA MATRIZ E MECANISMOS DE FISSURAÇÃO

Conforme o já afirmado inicialmente neste trabalho, um concreto de alto desempenho pode ser definido essencialmente como um concreto tendo uma relação água/aglomerante baixa (com a adição de sílica ativa ou outra adição, a expressão *fator água/cimento*, é substituída com vantagem pela expressão *fator água/aglomerante*, considerando-se *aglomerante* o cimento mais a adição em pó¹).

Sabe-se de antemão que os aditivos superplastificantes são capazes de melhorar as características da matriz original da argamassa armada (Família de

¹ Aditivos (geralmente líquidos, em pequena proporção) não devem ser confundidos com adições (geralmente em pó, em proporção apreciável); tradicionalmente, convencionou-se que os aditivos não entram no cômputo da massa do aglomerante.

traços I) cuja resistência é apresentada no gráfico 2.1 do capítulo 2, permitindo reduções importantes do fator água/cimento e do consumo de cimento, com a manutenção da consistência e ganhos significativos de resistência e, portanto, com perspectivas de economia e aumento da vida útil para os elementos de microconcreto.

Por sua vez, a incorporação simultânea de aditivo superplastificante mais adição de sílica ativa (10% da massa de cimento) à matriz do microconcreto, seguindo-se o exemplo dos concretos de alto desempenho, também pode resultar numa matriz de resistência substancialmente mais elevada. Se um microconcreto de alto desempenho de 57 MPa (Família de traços I) apresenta somente uma ligeira melhora de resistência quando comparado ao concreto usual empregado pelas empresas de pré-fabricados, cujas resistências variam geralmente entre os 35 e os 45 MPa, esse não é certamente o caso de um microconcreto incorporando estas inovações.

A redução da porosidade, por outro lado, traz como vantagem não apenas o aumento na resistência, mas principalmente uma proteção mais adequada para as armaduras e uma carbonatação muitíssimo mais lenta (SERRA e CAMPOS, 1999). Também está claro que esse material estará sujeito a uma fissuração intensa e rápida provocada pela retração hidráulica, caso não seja feita uma cura extremamente eficiente, preferencialmente por imersão em água ou ambiente saturado. No caso dos pré-fabricados leves, uma cura rigorosamente controlada em usina não chega a ser um problema maior, caso se compare com as condições normalmente existentes para que a mesma operação seja executada em estruturas moldadas no local.

É previsível, portanto, o fato de que a produção de um concreto de alto desempenho possa oferecer inicialmente maiores dificuldades do que a de um concreto usual, conforme afirma Aïtcin (AÏTCIN, 1998). Na medida em que a resistência à compressão aumenta, as propriedades do concreto de alto desempenho já não são as mesmas do concreto usual, relacionadas apenas com a relação água/aglomerante, parâmetro fundamental que determina a porosidade da pasta hidratada de cimento. No concreto usual a interface entre a matriz e os agregados representa o elo fraco da microestrutura do concreto, a partir de onde

o colapso mecânico começa a se desenvolver, quando o concreto é submetido à carga de compressão (AÏTCIN, 1998).

Analisando-se a microestrutura matriz do concreto armado ou da argamassa armada, pode-se identificar os mecanismos através dos quais se dá a microfissuração, enquanto fenômeno que consiste na propagação de fissuras a partir de vazios pré-formados na matriz de produtos à base cimento portland em geral (figura 7.1).

Estas falhas microscópicas, característica intrínseca do concreto e da argamassa, são provocadas por: ar incorporado e "água livre" na mistura, impurezas e deficiências de aderência na interface pasta de cimento/agregado.

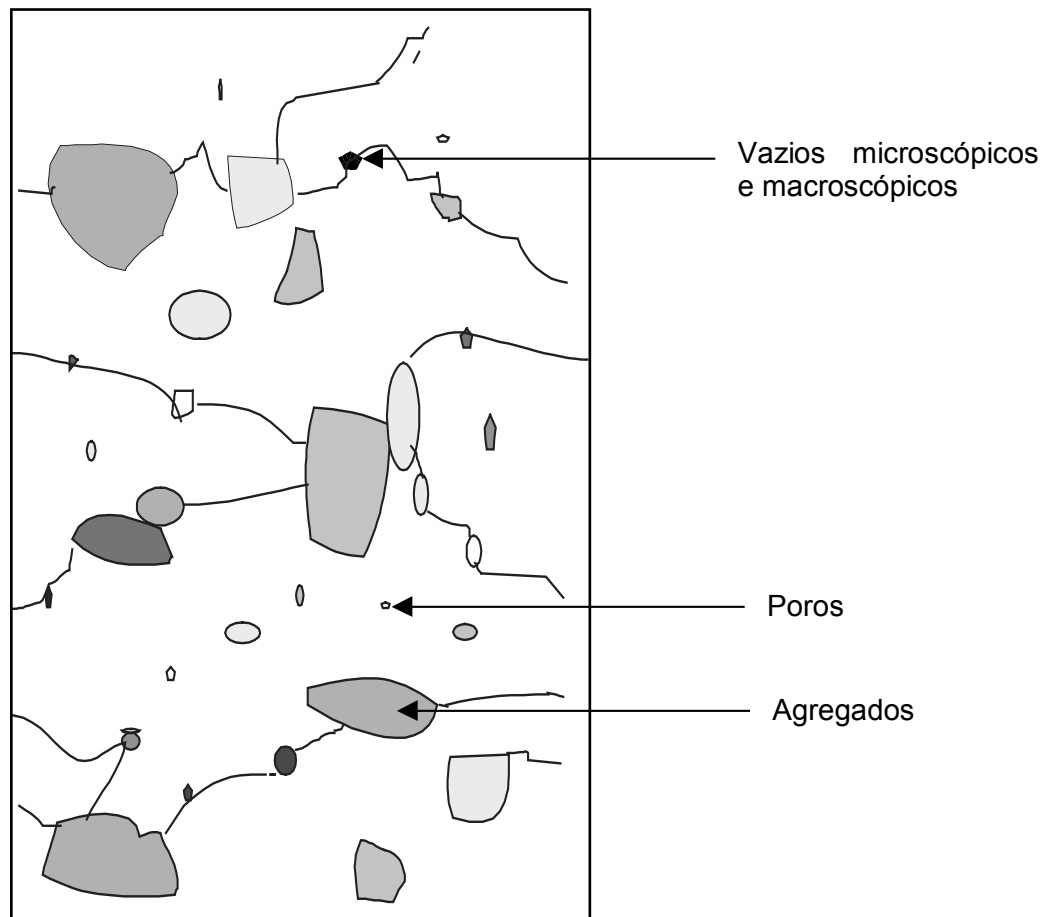


Figura 7.1 – Mecanismos de fissuração

Percorrendo o caminho de menor demanda energética, as microfissuras evoluem no interior da matriz a partir de um determinado nível de sollicitação, provocando uma progressiva fratura do material sólido (HANAI, 1987). Em geral,

a fissuração manifesta-se num primeiro momento na interface entre pasta de cimento endurecida e agregado, prosseguindo através da pasta de cimento, raramente propagando-se no interior dos agregados, pela sua dureza e resistência.

A partir da compreensão deste fenómeno é possível precisar a função das armaduras seja na argamassa armada seja no microconcreto armado, onde, para além de resistir aos esforços solicitantes, cumprem a função de elementos obstaculizadores à evolução da fissuração, segundo as características tecnológicas específicas do material.

Portanto, na medida em que a fissuração não evolui na matriz em função do aparecimento de barreiras em seu caminho, constituídas por fios de aço ou fibras, pode-se concluir que as armaduras, além do seu papel primário de absorver os esforços de tração, podem exercer a função de limitar a abertura das microfissuras.

Daí a definição original atribuída à argamassa armada, como o resultado da associação entre uma argamassa estrutural (cimento/areia/água) e uma armadura de aço constituída por fios de *pequeno* diâmetro e pouco espaçados entre si, com propriedades de "grande alongabilidade e infissurabilidade", como afirmou o engenheiro italiano Pier Luigi Nervi no passado (HANAI, 1987).

Na realidade, dentro dos limites da prática e da viabilidade econômica do material, o que ocorre é uma proximidade considerável entre os fios da armadura ou dos elementos de reforço, tal que as microfissuras pré-formadas na matriz têm o seu aparecimento eliminado ou sua abertura limitada, conduzindo ao conceito de fissuração controlada, hoje difundido no Brasil. As propriedades de estanqueidade e a durabilidade do material são também explicadas, até certo ponto, por estas características.

RESISTÊNCIA DO CONCRETO À COMPRESSÃO SIMPLES

Embora a resistência à compressão não seja a única propriedade que torna vantajoso o uso do concreto de alto desempenho, pode-se estabelecer uma relação direta entre as características da microestrutura da matriz que

determinam a resistência e outras propriedades importantes, tais como o módulo de elasticidade e a durabilidade (AÏTCIN, 1998).

Conforme ilustra a figura 7.1, na medida em que se aplica sobre o concreto usual uma carga de compressão axial, a interface entre a matriz e os agregados representa o elo fraco da microestrutura do material, a partir de onde o colapso mecânico começa a se desenvolver. Examinando-se a fotomicrografia a seguir (figura 7.2), feita a partir de uma amostra retirada de um corpo-de-prova submetido a uma carga de ruptura e moldado com a matriz original da argamassa armada (Família de traços I), cuja curva de resistência é apresentada no gráfico 2.1 do capítulo 2, pode-se observar na cor azul a forma como a ruptura se desenvolve, tanto dentro da pasta de cimento (cor marrom escuro) como ao longo da interface entre a pasta e as partículas do agregado miúdo (cor branca), uma vez que essas duas zonas constituem-se no elo mais fraco do concreto usual.

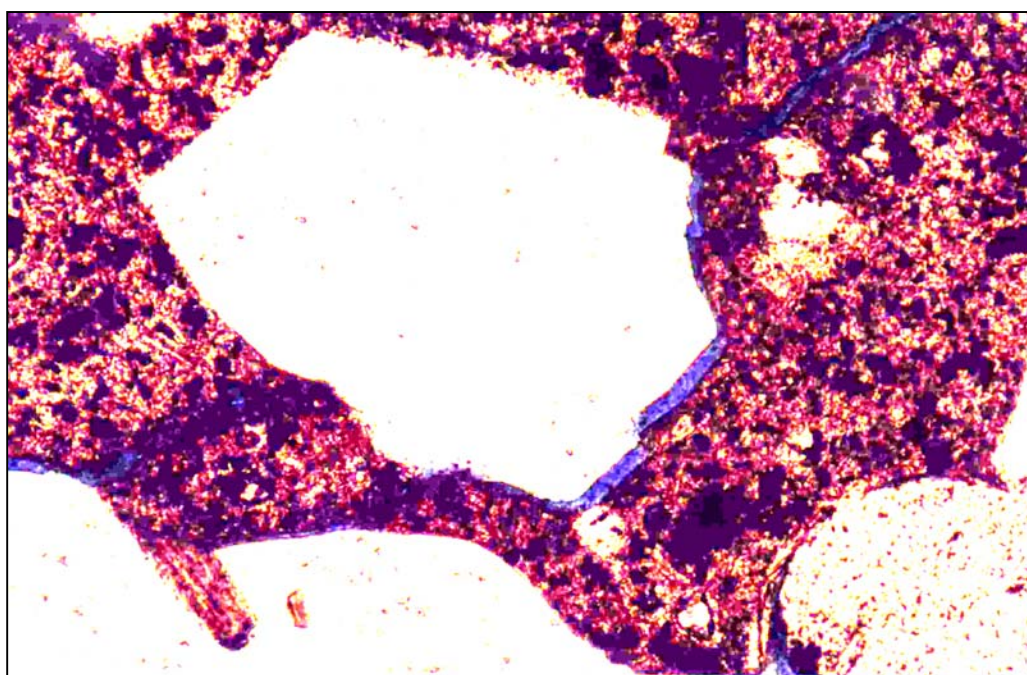


Figura 7.2 – Microfissuração da matriz do TRAÇO I (argamassa armada) em fotomicrografia com aumento de 10 vezes

A ruptura da matriz da argamassa ocorreu tanto no interior da pasta de cimento como na denominada zona de transição, ou seja, na interface entre a pasta de cimento hidratado e o agregado. A característica da zona de transição,

elo fraco dos concretos usuais, é uma maior porosidade da pasta de cimento hidratada nesta região da matriz (figura 7.2).

Conforme afirmam Mehta e Aïtcin, ao se ensaiar um concreto à compressão deve-se lembrar que a ruptura, especialmente à compressão, é um processo do tipo elo fraco. Dessa forma, além do número, tamanho e forma dos poros, a sua distribuição espacial ou concentração local é um fator determinante na ruptura (MEHTA e AÏTCIN, 1990).

A INFLUÊNCIA DOS SUPERPLASTIFICANTES E DA SÍLICA ATIVA

O concreto de alto desempenho nada mais é do que um concreto com uma baixa porosidade, a qual pode ser obtida pela redução da água livre na mistura, de modo a que as partículas de cimento estejam mais próximas entre si do que estariam em um concreto usual.

O uso de aditivos superplastificantes e de materiais cimentícios suplementares não constitui, a princípio, uma condição obrigatória sem a qual não é possível produzir-se um concreto de alto desempenho. Exemplo disso, como já dito várias vezes ao longo deste trabalho, é a própria matriz da argamassa armada na configuração em que foi utilizada na planta de produção da EMURB (1989-1992), a qual alcançou uma resistência à compressão aos 28 dias de 57 MPa (tabela 3.2 e gráfico 3.1 – capítulo 3), para um fator água/cimento de 0,413, podendo ser classificada como um concreto de alto desempenho classe I (resistência à compressão entre 50 e 75 MPa), conforme a classificação de Aïtcin (AÏTCIN, 1998) apresentada na tabela 3.3 do capítulo 3.

Na fábrica da EMURB, a exemplo das demais unidades de produção implantadas segundo o modelo produtivo idealizado pelo arquiteto João Filgueiras Lima, para compensar a perda de trabalhabilidade da matriz da argamassa armada, provocada pela sua baixa relação água/cimento característica, eram empregados meios mecânicos para promover a mistura forçada dos materiais constituintes, através de argamassadeiras de eixo horizontal, e a vibração enérgica da matriz durante o seu lançamento nas fôrmas, com o auxílio de moto-vibradores cuja frequência variava de 3.500 a 5.000 rpm (CAMPOS, 1994).

Entretanto, na medida em que se busca alcançar maiores resistências, ultrapassando-se a fronteira dos 75 MPa correspondente à Classe I para concretos de alto desempenho (AİTCIN, 1998), a seleção e o proporcionamento dos materiais constituintes passam a ser uma questão crítica.

Conforme o já visto neste capítulo, particularmente os agregados, na medida em que a pasta hidratada de cimento e a zona de transição tornam-se muito mais resistentes no concreto de alto desempenho, podem converter-se no elo mais fraco da matriz quando submetida a cargas de compressão.

O microconcreto de alto desempenho, na medida em que só utiliza agregados miúdos, usualmente areia natural, acaba por assegurar uma condição de resistência habitualmente mais simples de ser obtida do que no caso do concreto de alto desempenho feito com a adição de brita. A explicação para isso vem processo de obtenção da brita, a partir de explosões e da britagem por meios mecânicos, tratamentos estes violentos e que acabam por si só gerando uma quantidade razoável de microfissuras e defeitos nos agregados daí provenientes, até mesmo a partir de rochas sãs e resistentes (AİTCIN, 1998).

Portanto, a escolha dos agregados miúdos para a produção de um microconcreto de alto desempenho não chega a ser uma etapa tão crítica quanto normalmente o é para o concreto de alto desempenho contendo agregados graúdos.

Já o uso dos superplastificantes como redutores de água, mais do que como fluidificantes para facilitar o lançamento do concreto sem riscos de segregação e perda de resistência, é algo relativamente recente no mundo e data da década de 1980, quando ao se aumentar pouco a pouco as dosagens de superplastificante acima das faixas recomendadas usualmente pelos fabricantes, começou-se a perceber que estes aditivos poderiam ser usados como um redutor de água de grande alcance (AİTCIN, 1998).

Atualmente fala-se inclusive de concretos superfluidos de alta resistência e desempenho, onde os superplastificantes não só são um ingrediente essencial mas estão sendo usados progressivamente em teores mais elevados do que os usuais. São estruturas projetadas para durar 100 anos, de grande porte, expostas

a condições ambientais severas, tais como pontes e plataformas petrolíferas marítimas de concreto (MALHOTRA, 1998).

O concreto para estas estruturas emprega não só altas dosagens de superplastificantes como também a sílica ativa, de modo a se obter uma altíssima resistência e durabilidade. Bache, citado por Malhotra (MALHOTRA, 1998), relata o desenvolvimento de concretos superfluidos com resistências da ordem de 150 MPa aos 100 dias, incorporando superplastificante à razão de 1% a 4% em massa do material cimentício, mais a sílica ativa.

Por sua vez, ao se reduzir a relação água/aglomerante a níveis inferiores a 0,30, onde quase já não há água suficiente nem mesmo para hidratar completamente todo o cimento existente na mistura, é fundamental verificar a compatibilidade do cimento portland e do superplastificante utilizados, uma vez que os materiais separadamente podem estar rigorosamente dentro das normas, não apresentando porém o desempenho desejado quando juntos.

O emprego da sílica ativa como uma pozolana muito fina e reativa, por vezes, é também colocado como uma condição sem a qual não é possível produzir-se um concreto de alto desempenho. Como já afirmado inicialmente, trata-se de uma asserção parcialmente correta, visto que a sílica ativa é de fato um material cimentício suplementar muito importante e interessante para se conseguir resistências significativamente mais elevadas, além de otimizar outros aspectos relacionados à durabilidade.

A sílica ativa começou a ser utilizada como material cimentício suplementar para o concreto ao final dos anos 1970, na Escandinávia. Na América do Norte, somente no início dos 1980 é que a sílica ativa começou a ser usada desta forma (AÏTCIN, 1983; MALHOTRA et al., 1987).

Em consequência da divulgação dos avanços ocorridos nos países do norte da Europa, particularmente das experiências de Bache, os produtores do silício e do ferro-silício passaram a comercializar a sílica ativa como um material cimentício suplementar para o concreto em quase todas as partes do mundo, em menos de 5 anos. A exemplo dos países do hemisfério norte, também no Brasil os produtores de silício e de ferro-silício inicialmente coletaram este subproduto através de sofisticados sistemas de filtros, tendo em vista as leis ambientais que

impediam o lançamento deste pó extremamente fino na atmosfera, para num segundo momento passar a comercializá-lo como material cimentício suplementar na década de 1990.

Foi também Bache, citado por Aïtcin (AÏTCIN, 1998), quem demonstrou que a resistência à compressão máxima do concreto não depende apenas da qualidade, quantidade e eficiência dos materiais cimentícios usados, mas também do grau de compactação e da porosidade limite da matriz sólida formada depois que o processo de endurecimento está completo.

Em suma, tudo indica que os aditivos superplastificantes são capazes de melhorar as características das matrizes originalmente empregadas para a argamassa armada, permitindo reduções importantes no fator água/aglomerante e no consumo de cimento, mas mantendo a trabalhabilidade exigida pelos processos produtivos normalmente empregados nas plantas de produção de pré-fabricados leves, com ganhos significativos de resistência e, portanto, com perspectivas de economia e aumento da vida útil para os elementos delgados de concreto armado.

A incorporação de aditivo superplastificante mais adição de sílica ativa à matriz do microconcreto, por sua vez, pode resultar numa matriz de resistência substancialmente mais elevada e ainda menos porosa, o que traz como vantagem principal uma proteção mais adequada para as armaduras e uma carbonatação significativamente mais lenta.

CAP. 8 – PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS: METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS

Precedendo ao início dos estudos de dosagem, parte do corpo principal da pesquisa, foi elaborada uma metodologia experimental seguindo-se o Método de Dosagem IPT, amplamente conhecido e utilizado com sucesso em dosagens experimentais de concretos usuais, há mais de 70 anos. O método, introduzido por Ary Torres em 1927, sofreu algumas alterações por influência de outro conhecido como ITERS, descrito por Eládio Petrucci.

A adoção de um método experimental com as características do Método de Dosagem IPT explica-se em boa parte pelos objetivos a serem alcançados por este trabalho, no que se refere ao desenvolvimento de traços para um microconcreto de alto desempenho, que proporcionem além de elevadas resistência e durabilidade, a consistência exigida pelos processos normalmente empregados na produção de pré-fabricados leves.

Seguindo este critério, os traços estudados na foram formulados variando-se os consumos de cimento em 3 níveis (rico, médio e pobre), onde o traço de referência corresponde ao consumo médio de cimento. A consistência foi fixada em $270\text{mm} \pm 5\text{mm}$ na mesa de espalhamento (flow-table), descrita na MB-2519-Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone – Método de ensaio (ABNT, 1986), de modo a se estabelecer uma relação realista entre a mínima relação água/aglomerante desejável e uma trabalhabilidade compatível com as operações de lançamento, adensamento e acabamento que ocorrem na produção seriada de componentes pré-fabricados leves em usina.

Planejou-se duas séries de ensaios: Série de Ensaio Nº 1 - SE1 e Série de Ensaio Nº 2 – SE2. Para cada uma das séries foram moldados 2 corpos de prova por situação (tabela 8.1), para ensaios à compressão a 6 idades, variando entre 3 e 182 dias, perfazendo um total de 108 corpos de prova de 50mm por 100mm para cada série de ensaios (SE1 e SE2) ou 216 corpos de prova no total.

Ademais, adotaram-se os procedimentos prescritos na norma NBR-7215 – "Cimento: resistência à compressão" para os ensaios de resistência mecânica à compressão.

A execução e a posterior análise dos ensaios em referência foram feitas sob a co-orientação do Dr. Engº Carlos Eduardo de Siqueira Tango, pesquisador do IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, em cujos laboratórios foi realizada a parte experimental da pesquisa.

Tabela 8.1 – SÉRIE DE ENSAIOS Nº 1 - SE1 e SÉRIE DE ENSAIOS Nº 2 - SE2

CONDIÇÕES DE ESTUDO	TRAÇOS	IDADES						TOTAL
		3	7	28	63	91	182	
1. TRAÇO I DE REFERÊNCIA	rico	2	2	2	2	2	2	12
	médio	2	2	2	2	2	2	12
	pobre	2	2	2	2	2	2	12
2. TRAÇO II (aditivo SP)	rico	2	2	2	2	2	2	12
	médio	2	2	2	2	2	2	12
	pobre	2	2	2	2	2	2	12
3. TRAÇO III (SP + MS)	rico	2	2	2	2	2	2	12
	médio	2	2	2	2	2	2	12
	pobre	2	2	2	2	2	2	12
TOTAL SÉRIE DE ENSAIOS Nº 1 - SE1								108
TOTAL SÉRIE DE ENSAIOS Nº 2 – SE2								108
TOTAL GERAL								216

As três situações de estudo estabelecidas foram as seguintes:

- a) Família de TRAÇOS I - Reprodução do traço típico da argamassa estrutural de cimento e areia utilizada na usina de pré-fabricados da EMURB-Empresa Municipal de Urbanização de São Paulo, no período de 90 a 94, desenvolvido segundo a norma brasileira NBR-11173;
- b) Família de TRAÇOS II - Desenvolvimento de uma família de traços para microconcreto de alto desempenho incorporando-se aditivo

superplastificante, como redutor de água e de forma a baixar o consumo de cimento;

- c) Família de TRAÇOS III - Desenvolvimento de uma família de traços para microconcreto de alto desempenho incorporando-se aditivo superplastificante e adição de sílica ativa, de modo a superar largamente a resistência característica habitual das argamassas estruturais obtidas na Família de TRAÇOS I, da ordem de 50 MPa.

Os procedimentos previstos no Método de Dosagem IPT, apresentado passo-a-passo por Tango (TANGO, 1993), consistem nas seguintes etapas:

- A. Escolha do tipo de cimento e estabelecimento da dimensão máxima do agregado (D_{MAX})
- B. Estimativa da relação água/aglomerante (x) e do teor agregado cimento (m)
- C. Determinação experimental da proporção (α) argamassa seca/concreto seco
- D. Confecção dos traços “rico”, “médio” e “pobre”
- E. Ensaio à compressão e traçado do diagrama de dosagem IPT

PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM PASSO-A-PASSO

Adaptando-se o Método de Dosagem IPT às características do microconcreto de alto desempenho, foram adotados os seguintes procedimentos:

- A. Escolha do tipo de cimento e estabelecimento da dimensão máxima do agregado (D_{MAX})
- B. Definição das Famílias de TRAÇOS
- C. Escolha e dosagem do superplastificante (TRAÇOS II e TRAÇOS III)
- D. Verificação da compatibilidade cimento-superplastificante (TRAÇOS II e TRAÇOS III)
- E. Dosagem da sílica ativa (TRAÇOS III)

F. Determinação experimental da água de consistência (efetiva) e confecção dos traços “rico”, “médio” e “pobre”

G. Ensaio à compressão e traçado do diagrama de dosagem IPT

Cada uma das etapas em referência é descrita a seguir em detalhe, como forma de esclarecer e documentar os procedimentos adotados, ademais de possibilitar a sua reprodução por outros pesquisadores interessados.

A. Escolha do tipo de cimento e estabelecimento da dimensão máxima do agregado (D_{MAX})

O cimento escolhido foi do tipo CP-V ARI Plus, marca Eldorado, uma vez que está implícito no campo objeto deste trabalho a aplicação do microconcreto de alto desempenho na produção de pré-fabricados leves, onde o uso deste tipo de cimento é comum e quase obrigatório, tendo em vista a velocidade requerida para a desforma das peças.

Os resultados da análise química do cimento utilizado, feita no Laboratório de Química dos Materiais do IPT, são apresentados na Tabela 8.2.

O microconcreto utiliza somente agregados miúdos com dimensão máxima de $\varnothing = 4,8$ mm, ou seja, observando as especificações contidas na norma NBR-11.173, onde consta a dimensão máxima característica inferior a $\frac{1}{4}$ da menor espessura da peça (espessura média de 20 mm) ou $\frac{1}{2}$ da menor abertura das telas de aço. As areias normalmente utilizadas têm uma granulometria variando de média a grossa. Nos ensaios em referência foi utilizada uma areia cuja dimensão máxima característica é 2,4 mm e o módulo de finura é 2,35, conforme a determinação da composição granulométrica apresentada na Tabela 8.3.

Caso se estivesse trabalhando com um concreto usual, com agregados graúdos e miúdos, nesta etapa seria determinada a proporção da argamassa seca/concreto seco (α).

No entanto, para o traço usualmente utilizado para matriz da argamassa armada ou do microconcreto armado (1:2 em massa), onde há somente agregados miúdos, após estimar-se a relação água/aglomerante (x) e o teor

agregado/cimento (a) passou-se diretamente à determinação experimental da água de consistência ou água efetiva.

Tabela 8.2 – ANÁLISE QUÍMICA DO CIMENTO

TIPO DO CIMENTO	CP V
CLASSE DO CIMENTO	ARI
a) Componentes maiores	
Perda ao fogo (%)	2,34
Anidrido silícico (SiO ₂) (%)	19,76
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) (%)	4,81
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃) (%)	3,17
Óxido de cálcio (CaO) (%)	65,30
Óxido de magnésio (MgO) (%)	1,05
Anidrido sulfúrico (SO ₃) (%)	2,96
b) Componentes menores	
Óxido de sódio (Na ₂ O) (%)	0,08
Óxido de potássio (K ₂ O) (%)	0,76
Equivalente alcalino (em Na ₂ O)	0,58
Sulfeto (S ²) (%)	Não determinado
c) Determinações em separado	
Óxido de cálcio livre (CaO) (%)	1,37
Resíduo insolúvel (%)	0,42
Anidrido carbônico (CO ₂) (%)	1,14
Total	100,22
Ca CO₃	2,59

B. Definição das Famílias de TRAÇOS

Partindo-se da proporção dos materiais considerada usual para a matriz do microconcreto (1:2 em massa), definiu-se para a Família de TRAÇOS I (referência CEDEC/EMURB) os três traços de microconcreto (rico, médio e pobre) variando segundo as seguintes proporções agregado/cimento:

- Traço rico – $a - 0,5 = 1,5$
- Traço médio – $a = 2$ (traço de referência)
- Traço pobre – $a + 0,5 = 2,5$

Tabela 8.3 – DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA NR-7217/87

Peneiras		1ª determinação		2ª determinação		Média	
Nº	Abertura (mm)	Retido (g)	Individual (%)	Retido (g)	Individual (%)	Individual (%)	Acumulada (%)
4	4,8	2,7	0,50	4,0	0,78	1	1
8	2,4	15,4	2,85	15,6	3,03	3	4
16	1,2	66,9	12,36	57,7	11,22	12	16
30	0,6	159,7	29,51	142,7	27,75	28	44
50	0,3	169,5	31,32	165,2	32,13	32	76
100	0,15	96,3	17,80	99,0	19,25	18	94
<100	<0,15	30,6	5,66	30,0	5,83	6	--
Totais		541,1	100	514,2	99,99	100	2,35
Dimensão máxima característica (mm)				2,4	Módulo de finura		2,35

Posteriormente, para as dosagens das famílias do TRAÇO II e TRAÇO III, arbitrou-se um valor inicial para “a” igual a 2,5, partindo-se da premissa de que o superplastificante seria utilizado como um redutor de água, possibilitando em tese uma sensível redução no consumo de cimento e um aumento da resistência à compressão. Para as famílias de TRAÇOS II e TRAÇOS III definiu-se os três traços de microconcreto (rico, médio e pobre) variando segundo as seguintes proporções agregado/cimento:

- Traço rico – $a - 1 = 1,5$
- Traço médio – $a = 2,5$ (traço de referência)
- Traço pobre – $a + 1 = 2,5$

As diferenças existentes nas proporções agregado/cimento para as famílias de TRAÇOS II e TRAÇOS III, quando comparadas àquelas utilizadas na família de TRAÇOS I, justificam-se pela necessidade de ampliar o espectro dentro do qual vão se manifestar as características de alto desempenho dos microconcretos, de modo a estudá-las em função dos contrastes existentes entre si.

O consumo dos materiais por m³ de microconcreto é calculado através da expressão:

$$c = \frac{\gamma}{1 + a + x}$$

Onde:

γ = massa específica do microconcreto em kg/m³ (para estimativas utilizar 2.400 kg/m³)

c = consumo de cimento em kg/m³ de microconcreto

a = teor agregado miúdo/cimento do traço

x = relação água/aglomerante efetiva do traço

Na Tabela 8.4 são apresentados os consumos de materiais da série de ensaios nº 1 (SE1) segundo os traços definidos nesta etapa dos estudos de dosagem.

C. Escolha do superplastificante (TRAÇOS II e TRAÇOS III)

PASSO 1: Caracterização dos produtos

A eficiência dos superplastificantes disponíveis no mercado e a forma como estes atuam dentro da mistura são por vezes totalmente distintas, seja quanto à redução da quantidade de água livre na mistura que proporcionam seja quanto ao controle da reologia de um traço com relação água/aglomerante muito baixa.

Os superplastificantes comerciais podem ser geralmente classificados em três categorias mais comuns, de acordo com a natureza química da sua base:

I. Policondensado de formaldeído e melamina sulfonada (melamina sulfonada)

Líquido claro contendo geralmente apenas 22% de partículas sólidas, mas recentemente formulações contendo até 40% se sólidos têm sido propostas. Os superplastificantes melamínicos são, em geral, vendidos na forma do seu sal de sódio.

II. Policondensado de formaldeído e naftaleno sulfonado

Líquido marrom, com a quantidade total de partículas sólidas geralmente entre 40 e 42%. São também disponíveis na forma sólida como um pó amarronzado. Tanto a forma líquida como a forma sólida dos superplastificantes naftalenos estão disponíveis como sais de sódio ou de cálcio, mas mais freqüentemente como sal de sódio.

III. Lignossulfonato

A olho-nu é difícil notar qualquer diferença entre os superplastificantes naftaleno e lignossulfonato, pois ambos têm quase a mesma cor marrom, viscosidade e teor de sólidos.

O teor de sólidos é um outro aspecto a ser examinado com atenção, particularmente para os aditivos comercializados no mercado nacional, uma vez que geralmente os fabricantes não apresentam esta informação fundamental nas embalagens dos produtos, o que gera insegurança para os usuários.

A informação sobre o teor de sólidos ainda é encarada por alguns fabricantes nacionais de aditivos, por vezes, como um segredo industrial. O equívoco de se manter este “segredo de polichinelo” acaba por dificultar uma análise técnica comparativa do desempenho entre os produtos oferecidos no mercado, obrigando a ensaios adicionais para verificação do teor de sólidos dos aditivos escolhidos.

Tabela 8.4 – ADITIVOS REDUTORES DE ÁGUA

ADITIVO/FABRICANTE	DOSAGEM RECOMENDADA	CARACTERÍSTICAS
<p>1. RX 3000 A Atual CONPLAST RX 3000 NA Fabricado pela FOSROC-REAX</p>	<p>500 a 2500 ml para cada 100 kg de cimento ou 0,6% a 3,2% sobre a massa de cimento, considerando-se a massa específica de 1,275 g/cm³ (líquido)</p>	<p>Aditivo líquido, de cor marrom, massa específica de 1,275 g/cm³, pronto para ser usado, isento de cloretos e fabricado segundo as normas ASTM C-494 e EB-1763.</p>
<p>2. EUKOPLAST 1203 SP Atual RHEOBUILD 1205 Fabricado pela MBT</p>	<p>500 a 1200 ml para cada 100 kg de cimento ou 0,6% a 1,44% sobre a massa de cimento, considerando-se a massa específica de 1,20 g/cm³ (líquido)</p>	<p>Aditivo líquido, de cor marrom, massa específica de 1,20 g/cm³, pronto para ser usado, isento de cloretos e fabricado segundo as normas ASTM C-494 e EB-1763.</p>
<p>3. EUKOPLAST 811P Atual MASTERMIX 811N Fabricado pela MBT</p>	<p>200 a 450 ml para cada 100 kg de cimento ou 0,23% a 0,52% sobre a massa de cimento, considerando-se a massa específica de 1,16 g/cm³ (líquido)</p>	<p>Plastificante empregado em conjunto com o superplastificante RHEOBUILD 1205, por recomendação do fabricante. Aditivo líquido, de cor marrom, massa específica de 1,16 g/cm³, pronto para ser usado, isento de cloretos e fabricado segundo as normas ASTM C-494 e EB-1763.</p>
<p>4. GLENIUM 51 Atual GLENIUM 51 Fabricado pela MBT</p>	<p>500 a 800 ml para cada 100 kg de cimento ou 0,55% a 0,88% sobre a massa de cimento, considerando-se a massa específica de 1,10 g/cm³ (líquido)</p>	<p>Superplastificante desenvolvido para a indústria de pré-moldados, baseado num éter policarboxílico modificado. Aditivo líquido, viscoso, de cor marrom, massa específica de 1,10 g/cm³, pronto para ser usado, isento de cloretos e fabricado segundo as normas ASTM C-494 e ASTM C-1017. Compatível com todos os cimentos que atendem a ASTM.</p>

A escolha do superplastificante a ser empregado no desenvolvimento das Famílias de TRAÇOS II e III das séries de ensaios SE-1 e SE-2 foi baseada, num primeiro momento, em ensaios de compatibilidade do cimento portland (ARI Plus – Eldorado) e 4 possíveis aditivos que poderiam ser utilizados como redutores de água. As características dos 4 aditivos escolhidos são apresentados na tabela 8.4.

Segundo Neville (NEVILLE, 1997), a comparação de desempenho deve ser feita com base não na massa total de aditivo líquido, mas no teor de sólidos, onde encontra-se de fato o princípio ativo do produto. Sendo assim, buscou-se determinar o teor de sólidos de cada um dos aditivos químicos em referência, de modo a que as dosagens empregadas nas famílias de TRAÇOS II e TRAÇOS III correspondessem efetivamente ao teor de sólidos sobre a massa do cimento, desconsiderando-se a água adicionada na elaboração do produto final colocado à disposição no mercado, a não ser como parte da água de mistura.

A partir de ensaios previstos na norma NBR-12317 (EB-01401) - Verificação de Desempenho de Aditivos para Concreto – Procedimento (ABNT, 1992), a determinação do teor de sólidos apresentou os resultados que constam na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 – TEOR DE SÓLIDOS DOS ADITIVOS

ADITIVO	FABRICANTE	TEOR DE SÓLIDOS
1. RX 3000 AN	FOSROC-REAX	41,76 %
2. RHEOBUILD 1205	MBT	25,45 %
3. MASTERMIX 811N	MBT	33,92 %
4. GLENIUM 51	MBT	30,31 %

Por fim, procedeu-se também a um ensaio qualitativo para a verificação de uma eventual presença de cloretos entre os aditivos selecionados. O procedimento é extremamente simples e consiste em diluir algumas gotas de aditivo em água deionizada, acrescentando-se a seguir ácido nítrico (HNO_3) e algumas gotas de solução de nitrato de prata (AgNO_3) a 1%. O surgimento de opalescência na solução é o indicativo da presença de cloretos.

Adotando-se este procedimento expedito, confirmou-se a inexistência de cloretos nos 4 aditivos selecionados para os ensaios.

D. Escolha do superplastificante (TRAÇOS II e TRAÇOS III)

PASSO 2: Verificação da compatibilidade cimento-superplastificante

Uma vez determinado o teor de sólidos dos aditivos, já é possível verificar a eficiência de cada produto, a qual, por sua vez, dependerá também da sua compatibilidade com o tipo de cimento utilizado.

Além disso, o comportamento reológico de traços com baixa relação água/aglomerante não é semelhante ao de traços para concretos usuais, quando em presença de superplastificantes. Para uma dosagem de superplastificante, fixada uma determinada trabalhabilidade, o seu efeito redutor de água será tanto maior quanto mais baixa for a relação água/aglomerante. Segundo Neville (NEVILLE, 1997), para uma relação água/cimento de 0,40 a redução observada é de 23%, ao passo que para uma relação de 0,55 observa-se um redução de apenas 11%.

As dosagens de superplastificante empregadas para a produção de concretos usuais são geralmente muito baixas, da ordem de 0,5 a 1% da massa de cimento, já que o efeito desejado é simplesmente a melhora da trabalhabilidade. Já na hipótese de utilização dos superplastificantes como redutores de água, como é o caso dos concretos de alto desempenho, a dosagem é bem maior, podendo chegar aos 4% em massa de materiais cimentícios (MALHOTRA, 1999), cimento mais sílica ativa, por exemplo.

Portanto, é necessário conhecer estes comportamentos e averiguar empiricamente a eficiência dos aditivos através de métodos experimentais, já que a complexidade dos fenômenos químicos envolvidos não permite uma simples escolha baseada nas especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes, ainda que os produtos atendam às normas técnicas.

Os dois métodos mais utilizados para a verificação da compatibilidade cimento-superplastificante são o do mini-abatimento, desenvolvido por Kantro, e o método do funil de Marsh ou do tempo de escoamento de Marsh. O primeiro consiste em introduzir uma pequena quantidade de pasta com aditivo

superplastificante em um cone, para em seguida retirá-lo e medir, em duas direções perpendiculares, o diâmetro da pasta espalhada, calculando-se a média aritmética entre esses dois valores. Normalmente o espalhamento é medido aos 10, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos, para se analisar a perda de trabalhabilidade da mistura ao longo do tempo.

Já no método do tempo de escoamento de Marsh, determina-se o tempo que um dado volume de pasta com aditivo superplastificante leva para escoar através de um orifício, cujo diâmetro pode variar de 5 mm a 12,5 mm.

Aïtcin comenta que o método do mini-abatimento requer menos material para ser realizado, mas a avaliação do comportamento da pasta ocorre em determinados momentos, o que pode induzir a conclusões parciais e imprecisas. Segundo o mesmo autor, a vantagem do método do funil de Marsh é o fato da mistura ser ensaiada continuamente durante um intervalo de tempo, o que confere uma maior precisão e confiabilidade aos resultados (AÏTCIN, 1998).

Neste trabalho, uma vez que a consistência para as famílias de traços foi fixada a priori em $270\text{mm} \pm 5\text{mm}$, a ser medida na mesa de espalhamento (flow-table), conforme o método de ensaio previsto na NBR-9606/MB-2519 – “Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone” (ABNT, 1986), considerou-se que tanto as relações água/aglomerante efetivas para cada traço poderiam ser estabelecidas experimentalmente visando esta consistência requerida, como também poderia-se determinar experimentalmente a dosagem ótima de superplastificante através dos mesmos procedimentos.

Ou seja, ao se preparar as misturas das matrizes de microconcreto, e não somente de pastas, destinadas à confecção dos corpos de prova, seguindo-se os mesmos procedimentos já previstos no Método de Dosagem IPT para a determinação da água de consistência ou água efetiva, uma vez que já estavam determinados os consumos dos demais materiais, recorreu-se a iterações sucessivas, acrescentando-se gradativamente porções de superplastificante, até que fosse atingida a dosagem ótima para a consistência especificada.

De um ponto de vista prático, quando se optou pelo método de determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone (NBR-

9606/MB-2519) para estudar a compatibilidade reológica das matrizes estudadas, empregando um determinado cimento, e as marcas de superplastificante selecionadas, procedeu-se da seguinte forma:

- Preparou-se um microconcreto de referência sem aditivo superplastificante, já com a relação água/aglomerante corrigida a partir das iterações necessárias para determinação da água para se atingir a consistência especificada, o que equivale aos procedimentos que foram adotados para se proceder ao preparo da Família de TRAÇOS I;
- A seguir preparou-se um segundo traço de microconcreto, equivalente à Família de TRAÇOS II da série de ensaios nº 1 (SE-1), empregando uma dosagem inicial de superplastificante líquido de 2% (variando de 0,5 a 0,8% de sólidos, conforme a Tabela 8.5) em massa de material cimentício, para uma relação água/aglomerante de 0,35;
- Introduziu-se a matriz com aditivo superplastificante no cone especificado pela NBR-9606/MB-2519 – “Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone” (ABNT, 1986), para em seguida retirá-lo, aplicando os sucessivos golpes na mesa de espalhamento (*flow-table*) especificados na norma para medir, na seqüência, em duas direções perpendiculares, o diâmetro da matriz espalhada, calculando-se a média aritmética entre esses dois valores;
- Procedeu-se a iterações através de misturas sucessivas variando-se a quantidade de superplastificante líquido em massa de cimento, à razão de 0,5%, até que fosse atingido o limite de 5% de superplastificante líquido em massa de cimento (variando de 1,25 a 2,1% de sólidos, conforme a tabela 8.5) ou alcançada a dosagem ótima para a consistência especificada ¹;
- Após se chegar à dosagem ótima, pode-se ainda medir o espalhamento aos 10, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos, de modo semelhante ao ensaio de

¹ O limite de 5% que só veio a ser atingido na série de ensaios nº 2 (SE-2) e acima dele recomenda-se corrigir a água de consistência inicialmente prevista.

mini-abatimento, para se analisar a perda de trabalhabilidade da mistura ao longo do tempo.

Tabela 8.6 – QUADRO COMPARATIVO DOS ADITIVOS SELECIONADOS

ADITIVO/FABRICANTE	TEOR DE SÓLIDOS	PREÇO (**) (R\$/kg)	CONSUMO (catálogo)	COMPATIBILIDADE (ensaios)
1. RX 3000 AN FOSROC-REAX	41,76 %	3,46	0,60 a 3,2%	compatível
2. RHEOBUILD 1205 MBT	25,45 %	5,93	0,6 a 1,44%	incompatível
3. MASTERMIX 811N MBT (*)	33,92 %	2,18	0,23 a 0,52%	incompatível
4. GLENIUM 51 MBT	30,31 %	18,35	0,55 a 0,88%	incompatível

(*) – Plastificante empregado em conjunto com o superplastificante RHEOBUILD 1205, por recomendação do fabricante

(**) – Preços atualizados em dezembro de 2001, aos quais deve ser acrescentado o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) na alíquota de 10%

Este procedimento pode ser empregado tanto para se verificar as propriedades de um determinado número de superplastificantes comerciais —como é o caso nesta pesquisa, onde foram comparados os 4 aditivos redutores de água em referência, indicados na tabela 8.4— sempre utilizando o mesmo tipo de cimento, ou ainda, para verificar as propriedades de um determinado número de marcas cimentos portland, para um mesmo aditivo superplastificante de referência.

Finalmente, após cumprir todas as atividades previstas nestes dois passos das etapas C e D do método próprio aqui proposto tomando-se como base o Método de Dosagem IPT, foi possível fazer a escolha do aditivo superplastificante.

O aditivo superplastificante RX 3000 NA foi o único a apresentar condições adequadas nos ensaios de compatibilidade cimento-superplastificante, mantendo posteriormente a sua trabalhabilidade praticamente inalterada por um período de

até 30 minutos, tempo médio empregado para a confecção dos 12 corpos de prova moldados para cada situação de estudo (6 idades).

Para melhor explicitar a incompatibilidade verificada nos outros aditivos estudados, basta dizer que a despeito da sua mobilidade quase nula no ensaio de consistência pelo espalhamento do tronco de cone, tentou-se alcançar uma maior trabalhabilidade inclusive através de superdosagens, o que resultou ainda assim em uma mistura quase impossível de ser homogeneizada no misturador forçado do laboratório, o qual por vezes parava de trabalhar, especialmente nos traços contendo a adição de sílica ativa.

Para que o ensaio de compatibilidade através da determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone seja feito com vistas a uma aplicação na prática real de uma planta de produção de pré-fabricados, é necessário estender o método para períodos de tempo maiores, a 60, 90 e 120 minutos.

O aditivo comercial colocado no mercado sob a designação RX 3000 NA apresentou ainda o maior teor de sólidos, onde reside o princípio ativo do produto, e o melhor preço dentre aqueles produtos que foram examinados, o que só veio a reforçar a escolha.

Tabela 8.7 – QUADRO COMPARATIVO DE FINURAS

MATERIAL	FINURA (m ² /kg)
Sílica ativa	20.000
Fumaça do cigarro	10.000
Cinza volante	400 a 700
Escória de alto forno moída	500
Cimento portland	300 a 500

E. Dosagem de sílica ativa (TRAÇOS III)

Segundo Neville, a sílica ativa é um subproduto resultante da fabricação de silício ou de ligas de ferrossilício, materiais estes utilizados na indústria metalúrgica, a partir do quartzo muito puro e carvão, em fornos elétricos de eletrodos de arco submerso (NEVILLE, 1997). A sílica ativa é constituída por esferas de sílica amorfa muito pequenas, cujas finíssimas partículas possuem diâmetros médios de 0,1 μm a 0,2 μm , da ordem de 50 a 100 vezes menores que o grão de cimento (MEHTA, 1983). Na Tabela 8.7 é possível comparar a finura da sílica ativa com as de outras substâncias conhecidas.

Em suma, a sílica é um material reativo, cujas pequeníssimas partículas aceleram as reações com o Ca(OH)_2 produzido na hidratação do cimento Portland. A maior compacidade da pasta com adição de sílica ativa é conseguida a partir do preenchimento dos espaços entre as partículas de cimento, resultando daí uma microestrutura mais fechada e, portanto, uma matriz mais resistente e com características que favorecem a durabilidade.

Conforme o já exposto no início deste capítulo, a Família de TRAÇOS III foi projetada de modo a que fossem superadas largamente as resistências características habituais dos microconcretos obtidos na Família de TRAÇOS I, buscando conferir características excepcionais à microestrutura do material resultante, relativas à resistência e às exigências de durabilidade. Para concretos de alto desempenho cujas resistências variam de 50 a 80 MPa, a sílica ativa não é um insumo fundamental, como o já afirmado. No entanto, ao se projetar um traço cuja finalidade é ultrapassar a casa dos 100 MPa, caso a sílica ativa esteja disponível e a preços competitivos, o seu uso é recomendado, já que isso facilitará obtenção da reologia e da resistência desejadas (AÏTCIN, 1998).

Uma vez definido o emprego da sílica ativa para que fossem atingidos estes objetivos, era necessário escolher qual dos produtos disponíveis no mercado seria aplicado, bem como estabelecer a sua dosagem.

A sílica ativa fabricada pela Camargo Corrêa Cimentos, marca SILMIX, foi o produto escolhido. O teor da adição habitualmente empregado nos concretos de alto desempenho é da ordem de 8 a 10% em massa de cimento, ainda que

teoricamente, para fixar todo o potencial de cal liberada pela hidratação do C_3S e do C_2S do cimento, a dosagem de sílica ativa pudesse chegar de 25 a 30%. O fato é que dosagens tão elevadas são inviáveis economicamente devido à elevada quantidade de superplastificante que seria necessária (AÏTCIN, 1998).

Segundo o seu fabricante, SILMIX é um pó fino de cor cinza-clara, cujas partículas têm o diâmetro médio de 0,2 μm . Em 28 dias, conforme o fabricante, o concreto com adição de SILMIX apresenta um aumento na resistência de até 78% em relação ao concreto usual. As demais características físico-químicas do material são apresentadas na Tabela 8.8.

Tabela 8.8 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA

Massa específica	2.220 kg/m ³
Massa unitária	200 a 300 kg/m ³
Superfície específica	20.000 m ² /kg
Formato de partícula	esférico
Diâmetro médio	0,2 mm
Teor de SiO ₂	Mín. 85%
Umidade	Máx. 3%
Equivalente Alcalino	Máx. 0,5%

Devido à reatividade da sílica ativa, é possível usá-la em substituição a uma pequena percentagem do cimento necessário na mistura, sem prejuízos na resistência final. Neste caso, o objetivo é melhorar as propriedades dos concretos usuais, produzindo efeitos tais como a redução da exsudação e a melhoria da coesão da mistura (NEVILLE, 1997).

No caso do microconcreto de alto desempenho pretendido com os estudos de dosagem para a elaboração da Família de TRAÇOS III, fixou-se um percentual de adição do material em 10% da massa de cimento, com o objetivo principal de

aumentar a compacidade da mistura e melhorar a ligação na interface pasta-agregado.

Uma vez que o uso da sílica ativa implica numa grande superfície adicional a ser molhada, ao mesmo tempo em que se busca manter uma reduzida relação água/aglomerante como princípio fundamental para a produção de um concreto de alto desempenho, foi necessário compensar a previsível perda de trabalhabilidade com o aumento no teor de superplastificante, até o limite de arbitrado de 5% do líquido sobre massa de cimento (2,1% de sólidos, conforme a tabela 8.5).

F. Determinação experimental da água de consistência (efetiva) e confecção dos traços “rico”, “médio” e “pobre”

A consistência, conforme já dito, foi fixada de antemão em $270\text{mm} \pm 5\text{mm}$ na mesa de espalhamento (flow-table) - MB-2519 - Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone – Método de ensaio.

As relações água/aglomerante efetivas para cada traço foram estabelecidas experimentalmente visando a consistência requerida, ao se preparar as misturas destinadas à confecção dos corpos-de-prova. Para a determinação da água de consistência ou água efetiva, uma vez que já está determinado o consumo dos demais materiais, recorre-se a iterações sucessivas, acrescentando-se gradativamente porções de água, até que se atinja a consistência especificada.

Na tabela 8.9 são apresentadas as quantidades efetivas de água determinadas experimentalmente para a série de ensaios nº 1 (SE1), segundo os traços definidos nesta etapa dos estudos de dosagem.

Foram confeccionados 2 corpos-de-prova de 5cm x 10 cm para cada idade em cada situação de estudo (Família de TRAÇOS), totalizando 108 exemplares para a série de ensaios nº 1 (SE1). A moldagem dos corpos-de-prova foi feita de acordo com a norma NBR-5738 – “Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento” (ABNT, 1994), através do preenchimento dos moldes com 4 camadas de matriz, adensadas uma-a-uma com 30 golpes. Após o rasamento e o acabamento dos topos, os corpo-de-prova

são cobertos com uma lâmina de vidro e identificados, seguindo logo depois para os tanques de cura localizados na câmara úmida, onde são imersos em uma solução de água com cal.

G. Ensaios à compressão e traçado do diagrama de dosagem IPT

Após a cura em câmara úmida, os corpos-de-prova de microconcreto foram retirados dos tanques somente por ocasião da sua desmoldagem, para posterior ensaio de resistência a cada idade, quando foram rompidos.

Nos concretos de alto desempenho, como será visto no próximo capítulo, a resistência do composto de enxofre utilizado para os capeamentos dos corpos-de-prova de concretos usuais não é suficiente para que durante o ensaio à compressão, a ruptura ocorra em primeiro lugar no concreto e não no capeamento.

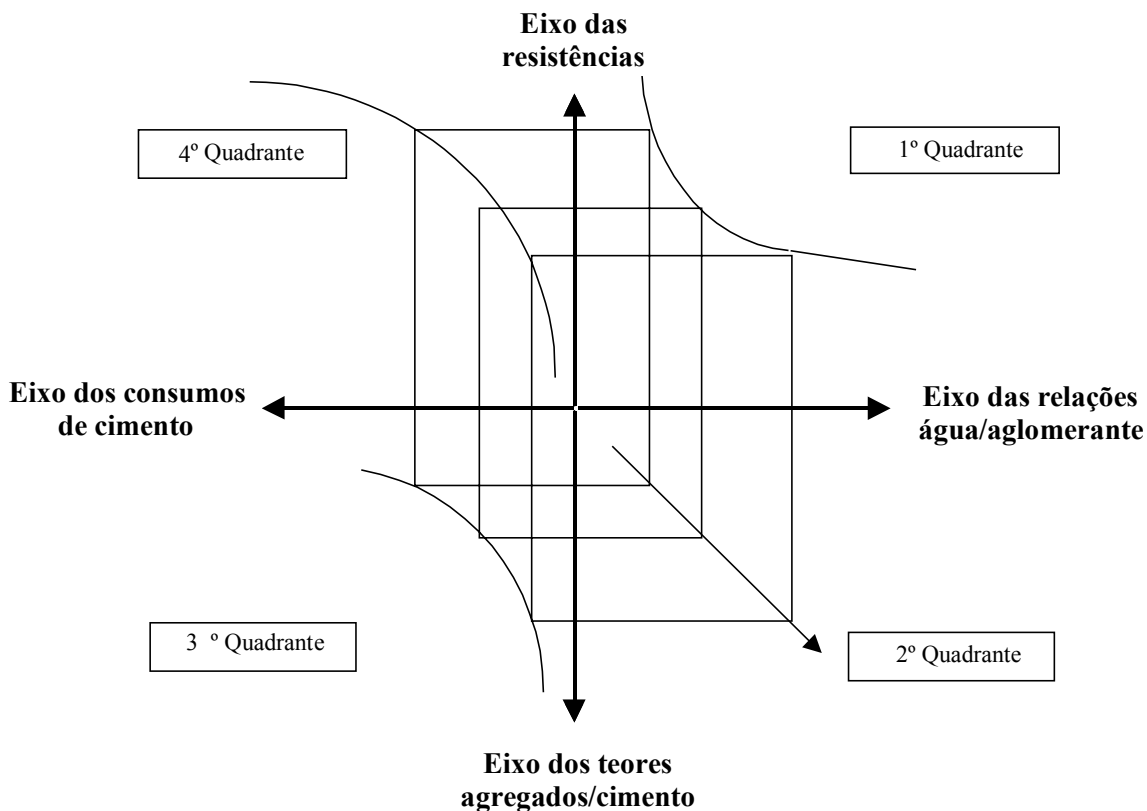


Figura 8.3 – Diagrama de dosagem IPT

Ou seja, deve-se preparar as extremidades dos corpos-de-prova com o auxílio de um torno mecânico, polindo-as de forma a prepará-las mais adequadamente aos ensaios de resistência à compressão.

Após o rompimento dos corpos-de-prova à compressão, calculando-se a tensão de ruptura obtêm-se os dados necessários para se traçar os diagramas de dosagem para cada família de traços.

A configuração genérica do Diagrama de Dosagem IPT utilizado é apresentada na figura 8.3. Nela pode-se observar que o 1º quadrante corresponde à Curva de Abrams, o 2º quadrante à Curva de Lyse e o 3º quadrante a Molinari, enquanto no 4º quadrante encontram-se os registros dos consumos de cimento/aglomerante (TANGO, 2000).

Tabela 8.9 – SÉRIE SE1: CONSUMO DE MATERIAIS E DETERMINAÇÃO DA ÁGUA DE CONSISTÊNCIA

1. TRAÇOS I DE REFERÊNCIA (EMURB)					CONSUMOS DE MATERIAIS (kg)					Massa específica
	Areia (a)	Aditivo SP	Fumo de sílica	Fator a/a	cimento	areia	aditivo SP	sílica MS	Água efetiva	
rico	1,5			0,38	0,968	1,452			0,3698	2268,3
médio	2,0			0,43	0,807	1,614			0,3432	2204,5
pobre	2,5			0,49	0,692	1,729			0,3367	2125,8
2. TRAÇOS II (aditivo SP)										
	Areia (a)	Aditivo SP	Fumo de sílica	Fator a/a						
rico	1,5	0,02		0,29	1,007	1,511	0,020		0,2901	2354,4
médio	2,5	0,02		0,38	0,720	1,799	0,015		0,2759	2265,3
pobre	3,5	0,02		0,56	0,560	1,958	0,011		0,3140	2154,8
3. TRAÇOS III (SP + Fumo de Sílica)										
	Areia (a)	Aditivo SP	Fumo de sílica	Fator a/a						
rico	1,5	0,02	0,1	0,40	0,901	1,502	0,020	0,100	0,3583	2394,5
médio	2,5	0,02	0,1	0,52	0,644	1,788	0,015	0,072	0,3318	2268,7
pobre	3,5	0,02	0,1	0,72	0,501	1,947	0,011	0,056	0,3624	2167,3

Nota: Consumo de materiais para produzir um volume de matriz igual a 1,3 dm³ ou litros, o qual equivale ao volume da caçamba do misturador utilizado em laboratório.

CAP. 9 – ENSAIOS REALIZADOS

SÉRIE DE ENSAIOS Nº 1: PROBLEMAS E REVISÃO DE PROCEDIMENTOS

Curados os corpos-de-prova até as idades de interesse, deu-se início aos ensaios de compressão axial, executados segundo o método de ensaio MB-3 (NBR-5739) – “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto” (ABNT, 1974). Os valores de resistência à compressão obtidos na série de ensaios nº 1 (SE1) são apresentados nas Tabelas 9.1, 9.2 e 9.3 a seguir.

Tabela 9.1 – RUPTURA DE CORPOS-DE-PROVA: RESULTADOS OBTIDOS – SE1 FAMÍLIA DE TRAÇOS I – REFERÊNCIA (CEDEC)

CORPOS DE PROVA			CARGA (kgf)	fc média (MPa)
TRAÇO	IDADE (dias)	C. P. Nº		
RICO	3	01	9350	46,6
		02	9300	
	7	03	11650	56,8
		04	11100	
	28	05	9700	50,5
		06	10500	
MÉDIO	3	13	8700	43,5
		14	8700	
	7	15	9450	49,1
		16	10200	
	28	17	9500	47,2
		18	9400	
POBRE	3	25	6550	32,7
		26	6550	
	7	27	7800	39,6
		28	8050	
	28	29	7850	39,7
		30	8050	

**Tabela 9.2 – RUPTURA DE CORPOS-DE-PROVA: RESULTADOS OBTIDOS –
SE1 FAMÍLIA DE TRAÇOS II – ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE**

CORPOS DE PROVA			CARGA (kgf)	fc média (MPa)
TRAÇO	IDADE (dias)	C. P. Nº		
RICO	3	37	12450	62,5
		38	12550	
	7	39	13400	65,7
		40	12900	
	28	41	15850	79,6
		42	16000	
MÉDIO	3	49	9650	48,1
		50	9600	
	7	51	10500	51,3
		52	10050	
	28	53	11200	56,5
		54	11400	
POBRE	3	61	5600	27,6
		62	5450	
	7	63	3300	17,0
		64	3500	
	28	65	7200	36,7
		66	7500	

**Tabela 9.3 – RUPTURA DE CORPOS-DE-PROVA: RESULTADOS OBTIDOS –
SE1 FAMÍLIA DE TRAÇOS III – ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE
E ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

CORPOS DE PROVA			CARGA (kgf)	fc média (MPa)
TRAÇO	IDADE (dias)	C. P. Nº		
RICO	3	73	9760	49,4
		74	10000	
	7	75	13150	64,6
		76	12700	
	28	77	15800	79,7
		78	16100	
MÉDIO	3	85	6820	34,0
		86	6800	
	7	87	9200	45,2
		88	8900	
	28	89	12800	63,5
		90	12600	
POBRE	3	97	3600	18,1
		98	3640	
	7	99	5250	25,9
		100	5100	
	28	101	7450	37,7
		102	7650	

Tabela 9.4 - CORRELAÇÕES ENTRE TRAÇOS E RESISTÊNCIAS – SE-1

1. Família de TRAÇOS I de referência (CEDEC)					fc média (MPa)		
	Areia	Aditivo (%)	Sílica (%)	a/a	3 dias	7 dias	28 dias
rico	1,5			0,38	46,6	56,8	50,5
médio	2,0			0,43	43,5	49,1	47,2
pobre	2,5			0,49	32,7	39,6	39,7
2. Família de TRAÇOS II (aditivo superplastificante)							
rico	1,5	0,02		0,29	62,5	65,7	79,6
médio	2,5	0,02		0,38	48,1	51,3	56,5
pobre	3,5	0,02		0,56	27,6	17,0	36,7
3. Família de TRAÇOS III (aditivo superplastificante mais sílica ativa)							
rico	1,5	0,02	0,1	0,40	49,4	64,6	79,7
médio	2,5	0,02	0,1	0,52	34,0	45,2	63,5
pobre	3,5	0,02	0,1	0,72	18,1	25,9	37,7

Correlacionando-se as dosagens das Famílias de TRAÇOS com os resultados dos ensaios de compressão, conforme o apresentado na Tabela 9.4 verifica-se que:

- Família de TRAÇOS I – Tomando-se a Família de TRAÇOS I de referência, praticados na planta de produção da EMURB (São Paulo, 1990-1992), cujo consumo de cimento equivale ao traço “médio”, pode-se observar que houve um ganho de resistência de apenas 7% no traço de consumo “alto”, onde o consumo de cimento é cerca de 5% mais elevado (algo em torno de 705 kg de cimento/m³). Ainda que não tenha sido utilizado qualquer aditivo foi possível reduzir a relação água/cimento (neste caso não há outro aglomerante) e alcançar resistência mais elevada, em função da maior quantidade de pasta na mistura. O traço “pobre” apresentou um fator a/c fora de norma.

- Família de TRAÇOS II – Já a Família de TRAÇOS II, onde está presente uma pequena percentagem de aditivo superplastificante (2% de líquido ou menos de 1% de sólidos sobre a massa de cimento), no traço cujo consumo de cimento equivale ao nível “médio”, pode-se observar que houve um ganho significativo de resistência que chegou a quase 20% aos 28 dias quando comparado ao traço “médio” de referência, com uma redução no consumo de cimento (1:2,5) e uma relação água/cimento de 0,38. Aqui, pode-se dizer, chegou-se a uma combinação de desempenho e economia extremamente positiva frente aos resultados que se estava perseguindo. No traço de consumo “alto” chegou-se a uma resistência característica de quase 80 MPa, porém à custa de um consumo de cimento muito elevado. O traço “pobre” apresentou um fator a/c fora de norma.
- Família de TRAÇOS III – Na Família de TRAÇOS III foi acrescentado, além do aditivo superplastificante na proporção de 2% de líquido (ou menos de 1% de sólidos) sobre a massa de aglomerantes (cimento mais materiais cimentícios suplementares), 10% de sílica ativa sobre a massa de cimento. O ganho de resistência foi extremamente modesto, caso se compare o traço “médio” desta Família de TRAÇOS III com o traço “médio” da Família de TRAÇOS II, além do que observou-se uma tendência de elevação inaceitável na relação água/aglomerante. Em suma, pode-se afirmar que a presença do aditivo superplastificante na proporção de 2% de líquido (ou menos de 1% de sólidos) sobre a massa de aglomerantes foi insuficiente, o que levou este pesquisador a considerar a hipótese de um aumento drástico no teor de aditivo superplastificante, até o patamar de 5% de líquido sobre a massa de aglomerantes, o que significaria algo em torno de 2% de sólidos, para a série de ensaios nº 2 (SE-2).

Adaptando-se o diagrama utilizado no Método IPT de Dosagem de Concretos (figura 8.3) ao estudo de microconcretos de alto desempenho, tem-se a partir dos resultados obtidos nas idades de 3, 7 e 28 dias nos ensaios à compressão axial das três famílias de traços, os gráficos 9.1, 9.2 e 9.3 a seguir.

Os gráficos em referência apresentam as relações água/aglomerante dos traços rico, médio e pobre para cada família de traços estudada; onde é adotado o expoente “n” para linearização da função logarítmica da resistência = F (idade⁻ⁿ) (TANGO, 2000).

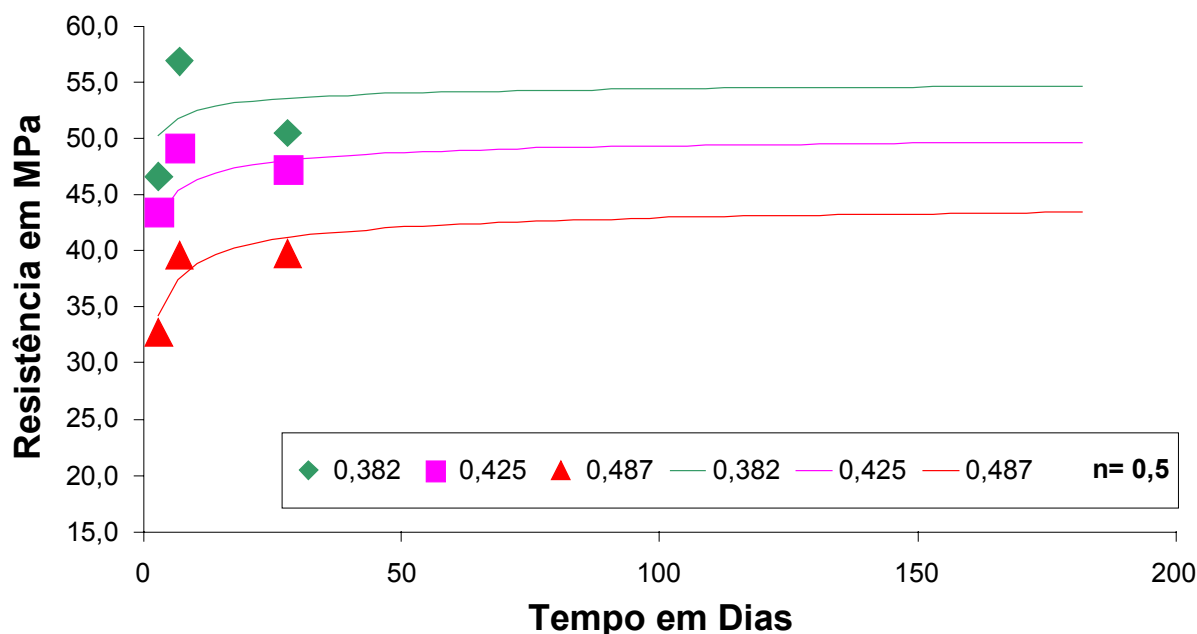


Gráfico 9.1 - Série de ensaios nº 1 (SE-1) - Resistência à compressão em função do tempo por relação água/aglomerante (Família de traços I)

A legenda apresenta as relações água/aglomerante, respectivamente, dos traços rico, médio e pobre; e o expoente “n” adotado para linearização da função log resistência = F (idade⁻ⁿ) (TANGO, 2000).

Analisando-se os resultados obtidos na série de ensaios nº 1 (SE1), bem como os gráficos daí resultantes, pode-se observar que há uma dispersão considerável das resistências apresentadas pelas famílias de traços I e II estudadas, quando confrontadas com as curvas de ganho de resistência provenientes do modelo desenvolvido por Tango (TANGO, 2000), com base em critérios estatísticos a partir de ensaios que vêm sendo executados

sistematicamente no IPT, com corpos-de-prova moldados há mais de cinco décadas (TANGO, 1990) ¹.

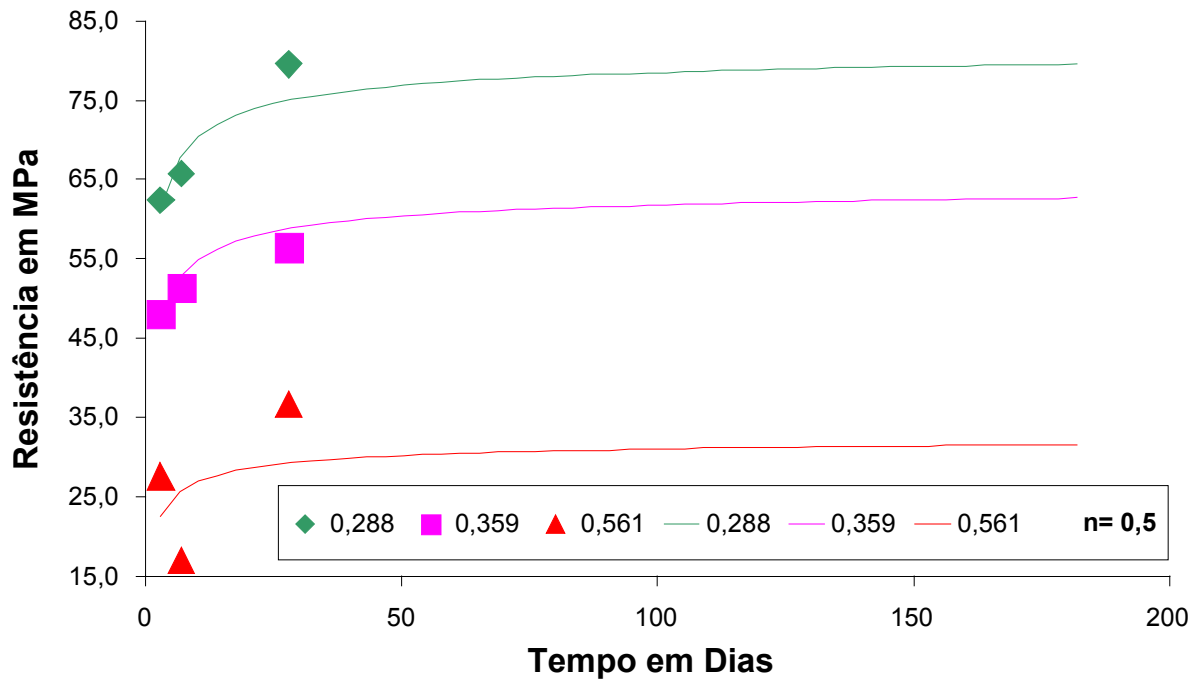


Gráfico 9.2 - Série de ensaios nº 1 (SE-1) - Resistência à compressão em função do tempo por relação água/aglomerante (Família de traços II)

A legenda apresenta as relações água/aglomerante, respectivamente, dos traços rico, médio e pobre; e o expoente “n” adotado para linearização da função $\log \text{resistência} = F (\text{idade}^{-n})$ (TANGO, 2000).

Independentemente da coincidência ou não das resistências apuradas com as curvas do modelo adotado, o fato é que sua variabilidade indicava uma falta de convergência inaceitável nos resultados da série de ensaios nº 1. Na medida em que dois corpos-de-prova semelhantes eram rompidos a cada idade e para cada situação prevista, salvo naqueles casos onde um deles foi excepcionalmente

¹ TANGO, Carlos Eduardo de S. Um estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto de cimento portland até 50 anos de idade. EPUSP. São Paulo, 1990 (Tese de doutorado).

descartado por problemas na sua moldagem, esta falta de convergência foi perceptível a cada ensaio de ruptura.

Além disso, percebeu-se que era após a idade de 3 dias que as diferenças de resistências entre corpos-de-prova “irmãos” se acentuavam. Em alguns casos, como na família de traços II (Gráfico 9.2), no traço “pobre”, a resistência da matriz chegou a diminuir na idade de 7 dias, quando comparada àquela alcançada aos 3 dias. Algo totalmente inesperado e intrigante.

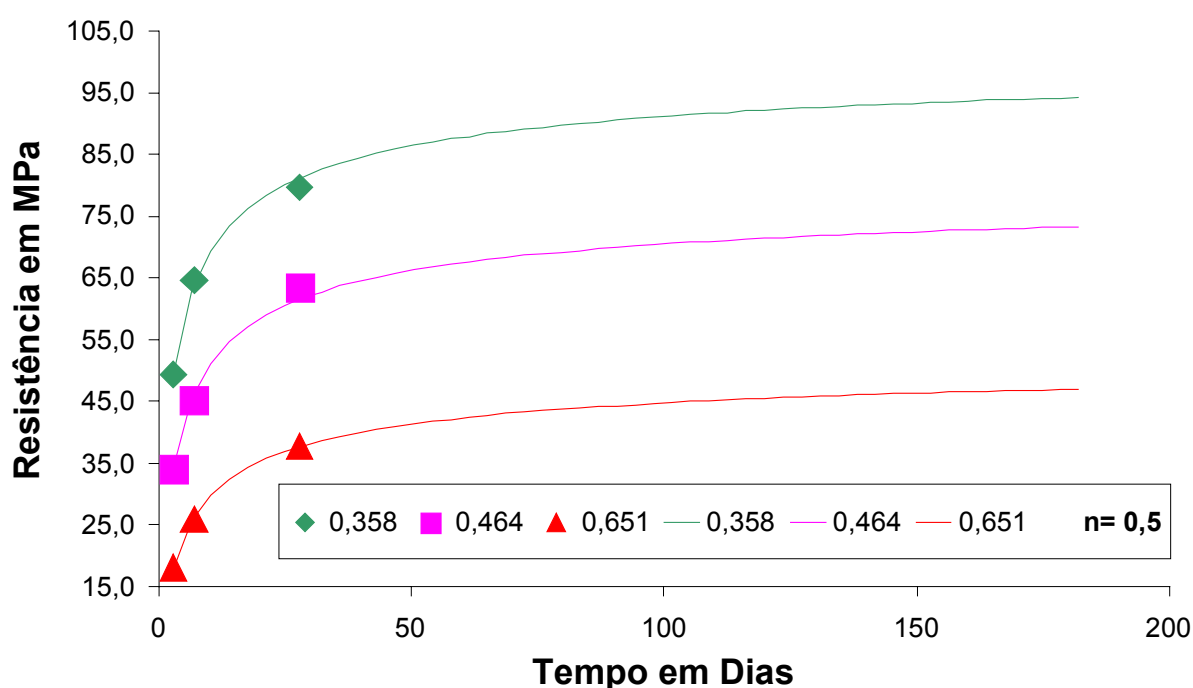


Gráfico 9.3 - Série de ensaios nº 1 (SE-1) - Resistência à compressão em função do tempo por relação água/aglomerante (Família de traços III)

A legenda apresenta as relações água/aglomerante, respectivamente, dos traços rico, médio e pobre; e o expoente “n” adotado para linearização da função $\log \text{resistência} = F(\text{idade}^{-n})$ (TANGO, 2000).

Entre as hipóteses cogitadas para explicar a dispersão de resultados em referência, estavam os seguintes problemas:

- Falhas na confecção dos corpos-de-prova, visto que nesta série de ensaios nº 1 a moldagem foi feita pelo próprio pesquisador e não por um técnico do laboratório de concreto do IPT;
- Uma possível troca de corpos-de-prova no tanque de cura por imersão;
- Falhas na cura dos corpos-de-prova;
- Um efeito comentado por Tango, citando Collepardi (TANGO, 1990), onde em concretos de alto desempenho, como resultado da relação água/aglomerante muito baixa, poderia haver uma porosidade inicial insuficiente nas primeiras idades para prover os espaços necessários para o desenvolvimento dos produtos de hidratação da pasta de cimento, o que provocaria o surgimento de tensões internas na sua microestrutura e um conseqüente enfraquecimento da matriz; e
- Uma decorrência do capeamento convencional dos corpos-de-prova, feito com enxofre, e cuja resistência é inferior à dos concretos de alto desempenho, cujas resistências variam geralmente de 50 a 150 MPa.

Diante da questão da variabilidade dos resultados apresentados, interrompeu-se a série de ensaios nº 1 após as rupturas aos 28 dias, considerando-se a hipótese da baixa resistência dos capeamentos dos corpos-de-prova como a explicação mais plausível, até porque partia-se da premissa maior deste trabalho, de que iria se chegar a traços de microconcreto de alta resistência.

Segundo Aïtcin (AÏTCIN, 1998) nos concretos usuais a resistência do composto de enxofre utilizado para os capeamentos é suficiente para que durante o ensaio à compressão, a ruptura ocorra em primeiro lugar no concreto e não no capeamento. O mesmo autor afirma ainda que um cubo de 50 mm de um composto comum de enxofre, via de regra, alcança uma resistência à compressão superior a 35 MPa. No entanto, essa grandeza está muito aquém das resistências projetadas, e efetivamente alcançadas, para as matrizes de microconcreto de alto desempenho.

Ou seja, a não ser que se utilize um composto de capeamento também de alta resistência, deve-se recorrer à solução habitualmente utilizada na engenharia

de rochas, onde a preparação das extremidades dos corpos-de-prova já não constitui um problema.

Com o auxílio de um torno mecânico, normalmente utilizado para a confecção de corpos-de-prova para ensaios de rochas, é possível polir as extremidades dos corpos-de-prova de microconcreto e prepará-los de forma mais adequada para os ensaios de resistência à compressão. Entretanto, estes equipamentos ainda não estão habitualmente disponíveis em todos os laboratórios de ensaio de concreto, como era o caso do próprio laboratório de concreto do IPT por ocasião desta pesquisa.

Sendo assim, buscou-se a colaboração da Dra. Geóloga Mírian Cruxên de Barros, da Divisão de Geologia do IPT, após o que se definiu que na série de ensaios nº 2, todos os topos dos corpos-de-prova cilíndricos passariam por um polimento prévio aos ensaios de resistência à compressão, executado nos tornos mecânicos existentes nos laboratórios do agrupamento de engenharia de rochas do IPT.

SÉRIE DE ENSAIOS Nº 2: AJUSTES E CONFIRMAÇÃO PARCIAL DAS HIPÓTESES

Os procedimentos seguidos para a série de ensaios nº 2 – SE-2 foram basicamente os mesmos já empregados na série de ensaios nº 1 – SE-1, tomando como base o Método de Dosagem IPT.

Os materiais constituintes utilizados na SE-2 foram também os mesmos, a saber:

- Cimento - tipo CP-V ARI Plus, marca Eldorado;
- Agregados miúdos - dimensão máxima de $\varnothing = 2,4$ mm e módulo de finura de 2,35, conforme a determinação da composição granulométrica apresentada na Tabela 8.3;
- Superplastificante - R 3000 A; e
- Sílica ativa- SILMIX (Camargo Corrêa).

Tomando-se mais uma vez o Método de Dosagem IPT para a série de ensaios nº 2 (SE-2), foram repetidos os procedimentos já adotados na série de

ensaios nº 1 (SE-1), a exceção de alguns ajustes que serão melhor detalhados a seguir.

Na Tabela 9.5 são apresentadas as quantidades efetivas de água determinadas experimentalmente para a série de ensaios nº 2 (SE2), segundo os traços definidos nesta etapa dos estudos de dosagem.

O ajuste mais importante ocorrido na SE-2 com relação à SE-1 refere-se à decisão de aumentar os teores de superplastificante na Família de TRAÇOS II e na Família de TRAÇOS III, até os limites de 4% e 5% em líquido sobre a massa de aglomerante, respectivamente. Estes percentuais, considerado-se o teor de sólidos do aditivo escolhido (R 3000 A) apresentado na Tabela 8.5, equivalem na verdade a 1,7% e 2,1% de sólidos sobre a massa de material cimentício.

É importante perceber que, na medida em que se tem o cuidado de verificar o teor de sólidos dos superplastificantes, ou seja, o percentual real de material ativo que toma parte na mistura, deve-se também sempre corrigir a relação água/aglomerante, descontando-se da água de mistura a quantidade de água presente no próprio aditivo líquido. Aitcin (AÏTICIN, 1998) apresenta uma fórmula bastante simples para calcular a quantidade de água a descontar, conforme segue:

$$M_{liq} = M_a + M_{sol} \quad \text{ou} \quad M_a = M_{liq} - M_{sol}$$

Onde:

M_{liq} = massa de aditivo superplastificante líquido

M_a = massa de água contida no aditivo superplastificante líquido

M_{sol} = massa de sólidos ativos contida no aditivo superplastificante líquido

Daí, pode-se utilizar a seguinte fórmula para achar a quantidade de água contida no aditivo superplastificante, quantidade esta a ser deduzida da relação água/aglomerante definida inicialmente.

$$M_a = V_{liq} \times G_{sup} \times \frac{100 - s}{s}$$

Onde:

M_a = massa de água contida no aditivo superplastificante líquido (g)

V_{liq} = volume de aditivo superplastificante a ser utilizado (cm³)

G_{sup} = massa específica do aditivo superplastificante

S = teor de sólidos do aditivo superplastificante

Após curados os corpos-de-prova da série de ensaios nº 2 (SE-2) até as idades de interesse, foram executados os ensaios de compressão axial segundo o método de ensaio MB-3 (NBR-5739) – “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto” (ABNT, 1974), utilizando-se inicialmente uma prensa hidráulica para ensaios à compressão, com capacidade nominal de 20 toneladas (figura 9.1).



Figura 9.1 - Prensa hidráulica inicialmente usada para os ensaios à compressão, com capacidade nominal de 20 toneladas

Os valores de resistência à compressão obtidos são apresentados nas Tabelas 9.6, 9.7 e 9.8. Através dos resultados apresentados é possível perceber que para as Famílias de TRAÇOS II e III da série de ensaios nº 2 (SE-2) já não era possível utilizar com segurança a prensa hidráulica de 20 toneladas, o que levou à necessidade de prosseguir os ensaios à compressão em uma prensa eletro-hidráulica de maior capacidade, marca Mohr e Federhaff AG - modelo BPPS 200, com capacidade de 200 toneladas (figura 9.2).



Figura 9.2 - Prensa eletro-hidráulica que passou a ser utilizada para os ensaios à compressão, com capacidade nominal de 200 toneladas

Tabela 9.5 – SÉRIE SE2: CONSUMO DE MATERIAIS E DETERMINAÇÃO DA ÁGUA DE CONSISTÊNCIA

1. TRAÇOS I DE REFERÊNCIA (CEDEC)					CONSUMOS DE MATERIAIS (kg)					Massa específica
	Areia (a)	Aditivo SP	Sílica ativa	Fator a/a	cimento	areia	aditivo SP	sílica MS	Água efetiva	
rico	1,5			0,39	0,968	1,452			0,383	2206,4
médio	2,0			0,43	0,807	1,614			0,347	2202
pobre	2,5			0,50	0,692	1,729			0,346	2168,8
2. TRAÇOS II (aditivo SP)										
	Areia (a)	Aditivo SP	Sílica ativa	Fator a/a						
rico	1,5	0,04		0,248	1,007	1,511	0,020		0,249	2309,5
médio	2,5	0,04		0,35	0,720	1,799	0,015		0,252	2267
pobre	3,5	0,04		0,53	0,560	1,958	0,011		0,297	2126,7
3. TRAÇOS III (SP + Fumo de Sílica)										
	Areia (a)	Aditivo SP	Sílica ativa	Fator a/a						
rico	1,5	0,05	0,1	0,235	0,901	1,502	0,020	0,100	0,235	2338,1
médio	2,5	0,05	0,1	0,33	0,644	1,788	0,015	0,072	0,234	2274,4
pobre	3,5	0,05	0,1	0,57	0,501	1,947	0,011	0,056	0,285	2175,6

Nota: Consumo de materiais para produzir um volume de matriz igual a 1,3 dm³ ou litros, o qual equivale ao volume da caçamba do misturador utilizado em laboratório.

**Tabela 9.6 – RUPTURA DE CORPOS-DE-PROVA: RESULTADOS OBTIDOS
– SE2 FAMÍLIA DE TRAÇOS I – REFERÊNCIA (CEDEC)**

CORPOS DE PROVA			CARGA (kgf)	fc média (MPa)
TRAÇO	IDADE (dias)	C. P. Nº		
RICO	7	03	10700	53,5
		04	--	
	28	05	12950	64,7
		06	--	
	91	09	15100	74,3
		10	14650	
	182	11	14900	75,9
		12	15500	
MÉDIO	7	15	9950	50,2
		16	10150	
	28	17	11350	57,1
		18	11500	
	91	21	12550	62,8
		22	12600	
	182	23	12950	64,7
		24	--	
POBRE	7	27	8000	40
		28	8000	
	28	29	8900	44,3
		30	8850	
	91	33	9800	49,3
		34	9950	
	182	35	9300	46,5
		36	--	

Tabela 9.7 – RUPTURA DE CORPOS-DE-PROVA: RESULTADOS OBTIDOS – SE2 FAMÍLIA DE TRAÇOS II – ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

CORPOS DE PROVA			CARGA (kgf)	fc média (MPa)
TRAÇO	IDADE (dias)	C. P. Nº		
RICO	7	39	14950	74,7
		40	--	
	28	41	16800	82,9
		42	16400	
	91	45	18500	92,4
		46	--	
	182	47	17900	92,7
		48	19200	
MÉDIO	7	51	11050	54,7
		52	10850	
	28	53	12200	61
		54	--	
	91	57	13850	70,6
		58	14400	
	182	59	14100	71,3
		60	14450	
POBRE	7	63	5100	25,7
		64	5200	
	28	65	6050	30,5
		66	6150	
	91	69	6850	33,5
		70	6550	
	182	71	7150	35,8
		72	7200	

**Tabela 9.8 – RUPTURA DE CORPOS-DE-PROVA: RESULTADOS OBTIDOS –
SE2 FAMÍLIA DE TRAÇOS III – ADITIVO
SUPERPLASTIFICANTE E ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA**

CORPOS DE PROVA			CARGA (kgf)	fc média (MPa)
TRAÇO	IDADE (dias)	C. P. Nº		
RICO	7	75	17650	88,3
		76	17700	
	28	77	21100	106,2
		78	21400	
	91	81	22300	114,4
		82	23500	
	182	83	24000	119,9
		84	--	
MÉDIO	7	87	12900	65,5
		88	13300	
	28	89	16700	83,6
		90	16750	
	91	93	19300	93,2
		94	18000	
	182	95	19400	96,4
		96	19200	
POBRE	7	99	6850	34,3
		100	6900	
	28	101	9900	48,5
		102	9500	
	91	105	10800	54
		10.6	10800	
	182	107	11150	56,1
		108	11300	

Correlacionando-se as dosagens das Famílias de TRAÇOS da série de ensaios nº 2 (SE-2) com os resultados obtidos nos ensaios de compressão, conforme o apresentado na Tabela 9.9, e por sua vez, comparando-se estes mesmos resultados com aqueles obtidos na série de ensaios nº 1 (SE-1), conforme o apresentado na Tabela 9.4, pode verificar-se que:

- Família de TRAÇOS I – Comparando-se esta Família de TRAÇOS de referência (EMURB) nas duas séries, SE-1 e SE-2, percebe-se que não há diferenças significativas de resistência entre os traços aos 7 dias, visto que aí ainda não havia uma influência determinante do capeamento de enxofre na distorção dos resultados dos ensaios de compressão da série de ensaios nº 1. Aos 28 dias, comparando-se as mesmas Famílias de TRAÇOS I nas duas séries, é evidente o prejuízo provocado pelo capeamento de enxofre na série de ensaios nº 1, seja pela variabilidade dos resultados ali obtidos seja pela queda de resistência observada. Compare-se, para tanto, a diferença de 10 MPa existente entre o traço “médio” da Família de TRAÇOS I da série de ensaios nº 1, cuja resistência foi de 47,2 MPa, contra os 57,1 MPa apresentados para a mesma dosagem na série SE-2. Portanto, é indiscutível a necessidade de se abandonar o capeamento de enxofre quando se está ensaiando à compressão um concreto de alto desempenho. Afastado este fator de incerteza que ocorreu na série SE-1, a série SE-2 veio a comprovar plenamente a hipótese de que, embora a resistência à compressão não seja o único parâmetro a ser considerado, a matriz da argamassa armada, na configuração em que esta se apresenta na NBR-11.173, originalmente utilizada na planta de produção da EMURB (1989-1993), alcançou uma resistência à compressão aos 28 dias de 57 MPa, para um fator água/cimento de 0,413, podendo ser classificada realmente como um concreto de alto desempenho Classe I (resistência à compressão entre 50 e 75 MPa), segundo a classificação proposta por Aïtcin para concretos de alto desempenho, apresentada na Tabela 2.2 do capítulo 2.

- Família de TRAÇOS II – Já na Família de TRAÇOS II, onde a percentagem de aditivo superplastificante passou a ser 4% de líquido nesta série SE-2 (ou cerca de 1,5 % de sólidos sobre a massa de cimento), houve um ganho de resistência entre 6 % e 8 %, dependendo da idade (7 ou 28 dias), quando comparados os traços “médios” nas duas séries SE-1 e SE-2. Portanto, seguiu-se aqui com uma redução no consumo de cimento (1:2,5) e uma relação água/cimento ainda menor, de 0,35, se comparada com a série SE-1. Dentro do caráter de contribuição ao desenvolvimento do conhecimento que deve estar expresso neste trabalho, chegou-se à confirmação parcial desta outra hipótese inicial, segundo a qual é possível alcançar uma combinação de desempenho e economia extremamente positiva ao se empregar os aditivos superplastificantes como redutores de água nas matrizes de microconcreto. Ou seja, é possível melhorar a matriz daquilo que se chamou de argamassa armada no passado, convertendo-a num microconcreto de alto desempenho a custos compatíveis com a tecnologia até então utilizada no país.
- Família de TRAÇOS III – Na Família de TRAÇOS III foi alcançada a confirmação parcial de uma terceira hipótese lançada. Na medida em que o aditivo superplastificante passou à proporção de 5% de líquido (ou 2% de sólidos) sobre a massa de aglomerantes (cimento mais materiais cimentícios suplementares), mesmo com os 10% de sílica ativa acrescentados sobre a massa de cimento, foi possível chegar à consistência desejada de $270\text{mm} \pm 5\text{mm}$ na mesa de espalhamento (flow-table), descrita na MB-2519-Concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone – Método de ensaio (ABNT, 1986). O ganho de resistência na Família de TRAÇOS III da série SE-2, onde o objetivo era sobretudo atingir a maior resistência possível, se possível ultrapassando a fronteira dos 100 MPa da classe III da Tabela 2.2 do capítulo 2, foi extremamente positivo, chegando-se no traço “rico” desta Família de TRAÇOS III para a série de ensaios nº 2 (SE-2) à resistência característica à compressão de 106,2 MPa.

Tabela 9.9 - CORRELAÇÕES ENTRE TRAÇOS E RESISTÊNCIAS – SE-2

1. Família de TRAÇOS I de referência (CEDEC)					fc média (MPa)			
	Areia	Aditivo (%)	Sílica (%)	a/a	7 dias	28 dias	91 dias	182 dias
rico	1,5			0,39	53,5	64,7	74,3	75,9
médio	2,0			0,43	50,2	57,1	62,8	64,7
pobre	2,5			0,50	40	44,3	49,3	46,5
2. Família de TRAÇOS II (aditivo superplastificante)								
rico	1,5	0,04		0,248	74,7	82,9	92,4	92,7
médio	2,5	0,04		0,35	50,2	57,1	62,8	64,7
pobre	3,5	0,04		0,53	25,7	30,5	33,5	35,8
3. Família de TRAÇOS III (aditivo superplastificante mais sílica ativa)								
rico	1,5	0,05	0,1	0,235	88,3	106,2	114,4	119,9
médio	2,5	0,05	0,1	0,33	65,5	83,6	93,2	96,4
pobre	3,5	0,05	0,1	0,57	34,3	48,5	54	56,1

A partir dos resultados obtidos nas idades de 7, 28, 91 e 182 dias nos ensaios à compressão axial das três famílias de traços, tem-se os gráficos 9.4 (reprodução do gráfico 2.1 já apresentado no capítulo 2), 9.5 e 9.6 a seguir. Os gráficos em referência apresentam as relações água/aglomerante dos traços rico, médio e pobre para cada família de traços estudada; onde é adotado o expoente “n” para linearização da função logarítmica da resistência = $F(\text{idade}^{-n})$ (TANGO, 2000).

Analisando-se os resultados obtidos na série de ensaios nº 2 (SE-2), bem como os gráficos daí resultantes, pode-se observar que não há dispersão das resistências como na série de ensaios SE-1 anterior. Quando confrontados os

resultados com as curvas de ganho de resistência provenientes do modelo desenvolvido por Tango (TANGO, 2000), com base em critérios estatísticos a partir de ensaios que vêm sendo executados sistematicamente no IPT, com corpos-de-prova moldados há mais de cinco décadas (TANGO, 1990), percebe-se também uma coincidência impressionante, o que acaba por atestar a validade do modelo proposto por Tango, assim como torna possível detectar eventuais distorções que possam ocorrer nos ensaios, como aquelas verificadas na série de ensaios SE-1.

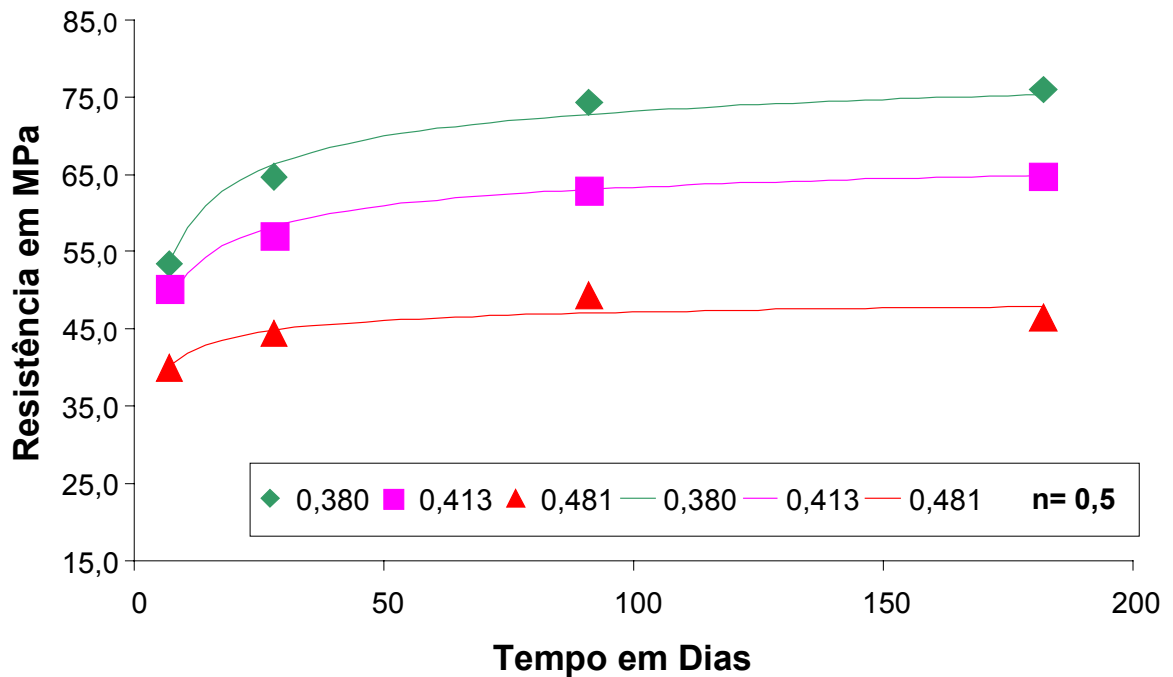


Gráfico 9.4 (Reprodução do Gráfico 2.1 – Capítulo 2) -Série de ensaios SE-2 - Resistência à compressão em função do tempo por relação água/aglomerante (Família de traços I)

A legenda apresenta as relações água/aglomerante, respectivamente, dos traços rico, médio e pobre; e o expoente “n” adotado para linearização da função $\log \text{resistência} = F(\text{idade}^{-n})$ (TANGO, 2000).

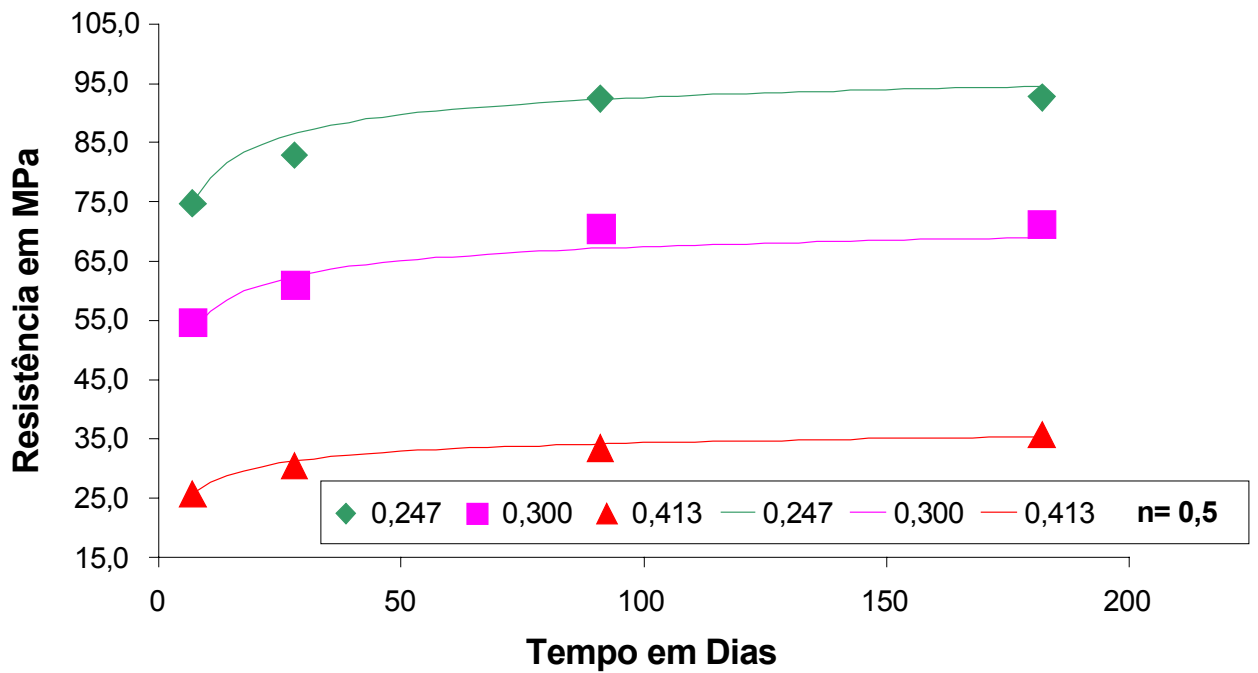


Gráfico 9.5 - Série de ensaios SE-2 - Resistência à compressão em função do tempo por relação água/aglomerante (Família de traços II)

A legenda apresenta as relações água/aglomerante, respectivamente, dos traços rico, médio e pobre; e o expoente “n” adotado para linearização da função $\log \text{resistência} = F (\text{idade}^{-n})$ (TANGO, 2000).

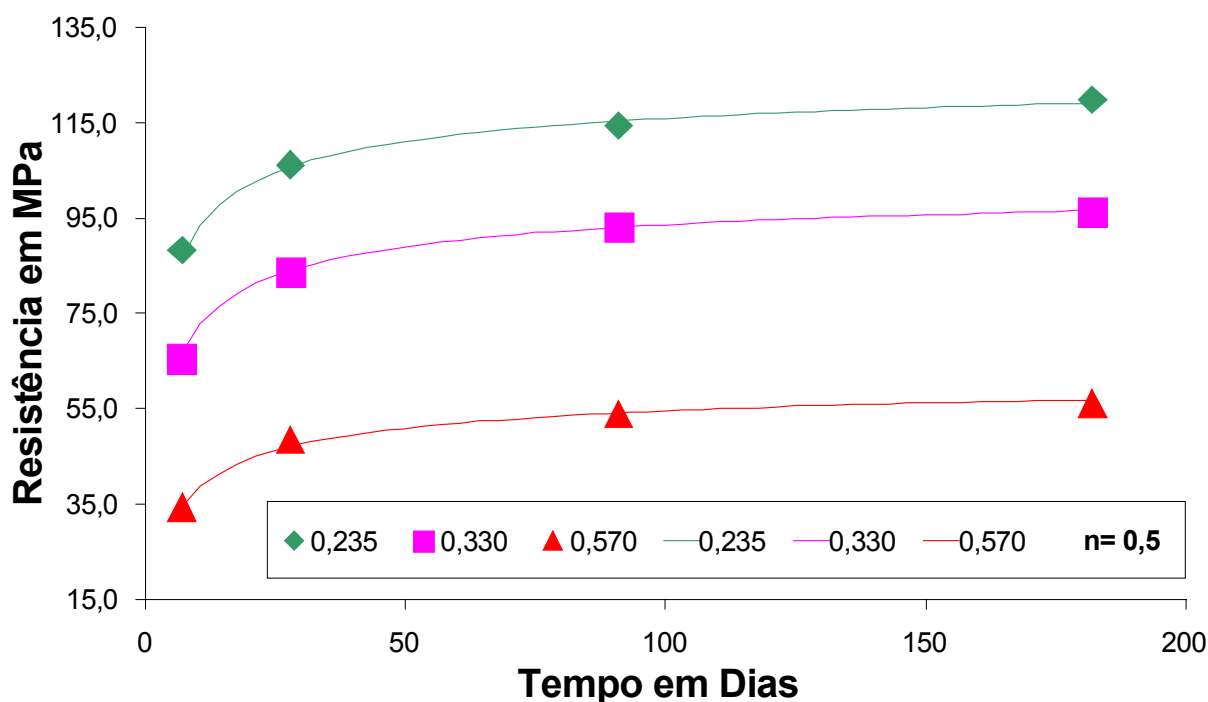


Gráfico 9.6 - Série de ensaios SE-2 - Resistência à compressão em função do tempo por relação água/aglomerante (Família de traços III)

A legenda apresenta as relações água/aglomerante, respectivamente, dos traços rico, médio e pobre; e o expoente “n” adotado para linearização da função $\log \text{resistência} = F(\text{idade}^{-n})$ (TANGO, 2000).

O cuidado ao se afirmar que as três hipóteses iniciais, quais sejam:

1. A matriz da argamassa armada, na configuração em que esta se apresenta na NBR-11.173, originalmente utilizada na planta de produção da EMURB (1989-1993), pode ser classificada realmente como um concreto de alto desempenho;
2. É possível alcançar uma combinação de desempenho e economia extremamente positiva ao se empregar os aditivos superplastificantes como redutores de água nas matrizes de microconcreto, numa analogia direta com a tecnologia hoje conhecida como concreto de alto desempenho, conferindo, portanto, uma perspectiva de aumento da

vida útil para os elementos delgados executados com o microconcreto;
e

3. É possível se obter resistências extremamente elevadas com o microconcreto, aqui colocado como um sucedâneo da matriz da argamassa armada, superando-se inclusive a casa dos 100 MPa, numa analogia direta com a tecnologia hoje conhecida como concreto de alto desempenho, na medida em que se utiliza aditivos superplastificantes como redutores de água e materiais cimentícios suplementares como a sílica ativa, também apontando para uma perspectiva de aumento da vida útil para os elementos delgados executados com o microconcreto;

foram parcialmente comprovadas, significa dizer que não se está em absoluto ignorando o fato da resistência à compressão ser apenas um dos parâmetros para se considerar uma determinada matriz cimentícia como sendo um concreto de alto desempenho.

Por fim, a realização dos ensaios de resistência permitiu também uma avaliação mais aprofundada das hipóteses iniciais da pesquisa no que tange às inspeções de campo e às análises correspondentes, expostas no capítulo 6 deste trabalho, o qual trata da sua base empírica.

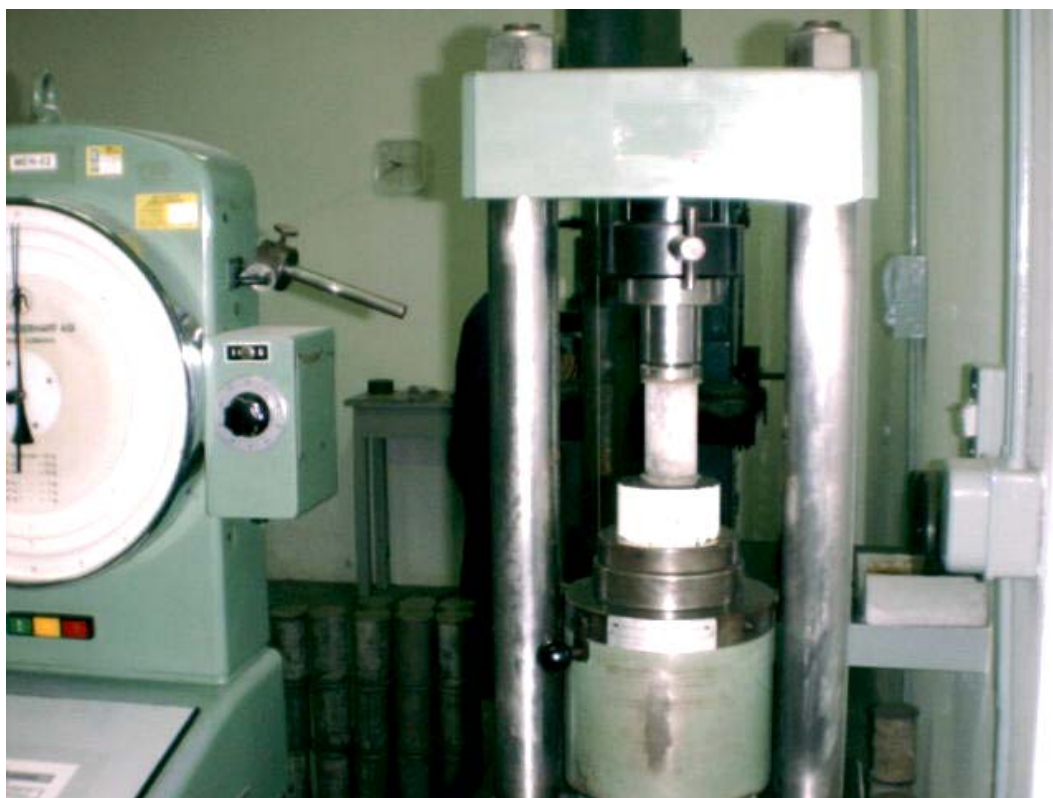


Figura 9.X - Máquina de ensaio – fabricante: Mohr & Federhaff – tipo: hidráulica a compressão – capacidade nominal: 20 toneladas

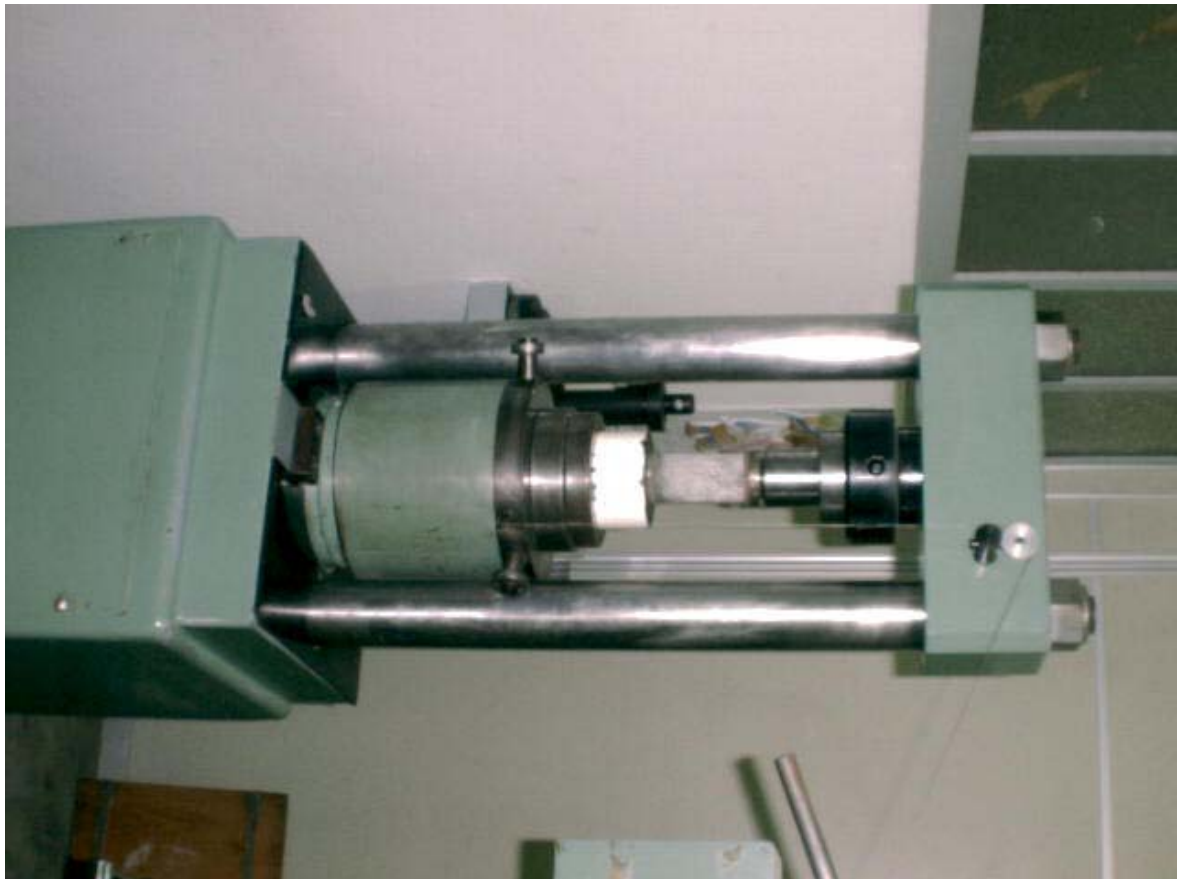




Figura 9. X - Máquina de ensaios à compressão – fabricante: Mohr e Federhaff AG – modelo: BPPS 200 – tipo: eletro-hidráulica – ano: 1969 – capacidade máxima: 200 toneladas





CAP. 10 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A DURABILIDADE DO MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

A QUESTÃO DA DURABILIDADE EM FOCO

Hanai e El Debs, em seu artigo de 1994 intitulado “The future of ferrocement in the Civil Engineering Construction; some questions, answers and trends” (HANAI e EL DEBS, 1994), colocam objetivamente a durabilidade como sendo a principal questão a ser enfrentada com respeito ao desempenho dos elementos delgados de ferrocimento e de argamassa armada.

Os mesmos autores comentam, por outro lado, que trabalhos abordando objetivamente os problemas de durabilidade do ferrocimento, incluindo-se aqui também a argamassa armada, não haviam sido produzidos em número suficiente até aquele momento. Para tal afirmação, baseavam-se na pesquisa feita na mesma época sobre a bibliografia internacional produzida na década de 1980 e início dos anos 1990, já comentada no capítulo 1 deste trabalho, cujos resultados são apresentados na tabela 1.1, identificando as tendências da pesquisa sobre a tecnologia da argamassa armada. Entre as referências constantes na Base de Dados “Dialog Compedex” (1985-1992), em particular, somente 5,2% dos artigos podiam ser classificados como realmente relacionados à durabilidade.

O mesmo artigo, após indicar a pouca atenção dada ao tema da durabilidade do ferrocimento ou da argamassa armada, aponta as seguintes deficiências nesta linha de pesquisa:

- Há falta de pesquisadores na área;
- Não há uma bibliografia ordenada que trate especificamente do assunto;
- Não há muita informação sobre patologias em construções de ferrocimento ou argamassa armada; e
- Somente alguns poucos artigos no período de 8 anos estudado traziam alguma informação específica.

Hanai e El Debs afirmam também que “apesar da relação água/cimento relativamente baixa recomendada para a matriz da argamassa (0,38-0,45), isso não é por si só suficiente para garantir a proteção da armadura contra a corrosão, mesmo em ambientes medianamente agressivos” (HANAI e EL DEBS, 1994). Importante que se diga, que as peças de argamassa armada a que se refere o artigo possuem um cobrimento de armadura típico da ordem de 3 mm a 8 mm.

No presente trabalho tomou-se como base empírica inicial da pesquisa, precisamente, as inspeções às obras executadas por algumas das principais plantas de produção de pré-fabricados de argamassa armada implantadas no país entre 1980 e o início da década de 1990, conforme apresentado no capítulo 6. Através da análise dos resultados pôde-se constatar as características potenciais de elevado desempenho da argamassa armada quando aplicada segundo a configuração prescrita na norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada”, assim como as deficiências em termos de durabilidade e as patologias surgidas em obras que não seguiram estes preceitos.

Sendo assim, contrariando em parte a colocação apresentada no artigo de Hanai e El Debs em referência, pode-se aqui afirmar mais uma vez que as matrizes usualmente empregadas na produção de elementos de argamassa armada, segundo a configuração prescrita na norma brasileira NBR-11.173, alcançaram um nível satisfatório em termos qualitativos e protegem as armaduras, e as inspeções a obras apresentadas no capítulo 6 deste trabalho demonstraram isso.

A baixa relação água/cimento para a matriz da argamassa armada indicada pelos autores, no intervalo de 0,38 a 0,45, por sua vez, é um conceito demasiadamente genérico e amplo quando confrontado com o nível de controle que pode e deve ser exercido atualmente sobre o teor de água livre em uma matriz de alto desempenho. Uma variação da relação água/aglomerante, da ordem de grandeza sugerida, quando ocorre num traço de concreto de alto desempenho, como indica Aitcin, representa uma diferença não desprezível em termos de abatimento, resistência à compressão e permeabilidade (AÏTCIN, 1998).

Porém a redução da relação água/aglomerante da matriz cimentícia não é a única preocupação quando se quer obter uma peça pré-fabricada durável de microconcreto armado, para que se possa aqui produzir uma analogia com a argamassa armada. Outros aspectos podem comprometer a durabilidade, particularmente o detalhamento construtivo das peças pré-fabricadas com armaduras metálicas.

A restrição às espessuras mínimas nominais de cobrimento praticadas a partir da norma NBR-11.173, na visão deste pesquisador, decorre muito mais das disposições construtivas das armaduras de aço, arranjos físicos e emendas, incompatíveis com as tolerâncias mínimas que seriam necessárias nos processos habitualmente empregados nas linhas de produção de pré-fabricados leves. Considerando-se, por exemplo, a espessura nominal de cobrimento indicada na norma brasileira, igual a 6 mm (tolerância de ± 2 mm) para ambientes não protegidos (exterior), tem-se um cobrimento mínimo que pode chegar a 4 mm. Isso significa na prática que as pontas de arame recozido nº 18, utilizado habitualmente para unir as telas e fios de aço das armaduras, caso não estejam dobradas cuidadosamente para o interior da peça, podem vir a se tornar o caminho para a corrosão das armaduras. Nas zonas de traspasse de fios e telas, o risco de não manutenção do cobrimento mínimo também é freqüente. Prova destas constatações provêm das mesmas inspeções a obras apresentadas no Capítulo 6 deste trabalho. Nas obras executadas pela fábrica da EMURB (1989-1993) em São Paulo, segundo a norma NBR-11.173, não foram verificadas patologias generalizadas, mas sim pontos de corrosão localizados e passíveis de tratamento corretivo. Ou seja, de uma forma geral, a qualidade da matriz da argamassa, neste caso com um fator água/cimento entre 0,40 e 0,42, protegeu as armaduras e apresentou uma espessura de carbonatação inferior a 1 mm, após quase 10 anos, conforme o exposto no capítulo 6. Os pontos de corrosão identificados localizavam-se em zonas de alta densidade de armaduras metálicas, especialmente nas vigas de cobertura, maiores peças do sistema construtivo empregado pela EMURB, com uma altura de 0,40 m e 5,625 m de comprimento.

Voltando à questão da qualidade da matriz cimentícia propriamente dita, ao se projetar o traço para o microconcreto de alto desempenho preconizado neste

trabalho, tem-se a certeza de que a relação água/aglomerante será necessariamente baixa para se obter um concreto durável. Mas esta condição indispensável não é suficiente, já que etapas posteriores de produção, tais como o lançamento, o adensamento e a cura, também são partes fundamentais no processo de obtenção do microconcreto de alto desempenho.

Portanto, a exemplo do concreto, a durabilidade do microconcreto de alto desempenho é função das suas propriedades intrínsecas e da agressividade do meio ambiente a que será submetido, mas também será influenciada pelos detalhes construtivos, pelas condições de produção e pela cura.

Neste capítulo, cumpre esclarecer, não se pretende abordar o tema da durabilidade à luz dos critérios gerais de projeto e execução existentes na norma de argamassa armada, mas restringindo-se o assunto à qualidade da matriz e ao quanto esta pode influenciar no ganho de vida útil.

VIDA ÚTIL E ADEQUAÇÃO TECNOLÓGICA

Sobre o conceito de vida útil vale inicialmente relembrar que a durabilidade do concreto não significa vida indefinida, nem tampouco suportar qualquer tipo de ação (NEVILLE, 1997). Neville citando Carter (CARTER, 1989) considera natural inclusive a necessidade de uma manutenção periódica de rotina no concreto.

Hanai dedicou um capítulo de seu livro “Construções de argamassa armada; fundamentos tecnológicos para projeto e execução” (HANAI, 1992) para introduzir um marco teórico essencial para se entender a trajetória recente da argamassa armada no Brasil, particularmente durante os últimos 20 anos, e definir qual o significado de durabilidade para as estruturas de elementos delgados de concreto.

Ao discorrer sobre o tema “A adequação tecnológica”, Hanai comenta que “com muita frequência, os mais entusiasmados pela ‘nova’ tecnologia, diante do amplo espectro de possíveis aplicações da argamassa armada, perguntam sobre a viabilidade de se executar isso ou aquilo — às vezes com muita criatividade e preparo técnico, outras sem o necessário conhecimento de fundamentais relações entre materiais, técnicas e aplicações”.

Na verdade, este mesmo comentário poderia ter sido estendido a muitos dos críticos de primeira hora da “nova” tecnologia, alguns deles técnicos e acadêmicos, que sem o necessário conhecimento específico puseram-se em campo para fazer coro com alguns dos interesses inconfessáveis que estiveram em jogo por ocasião da execução do malogrado megaprograma do governo federal dos CIACs-Centros Integrados de Apoio à Criança, no ano de 1994.

Este pesquisador recorda perfeitamente bem, por exemplo, a entrevista concedida à época pelo deputado paulista e engenheiro civil Alberto Goldman, onde em horário nobre e durante o jornal televisivo mais assistido no país, o parlamentar entrou em um CIAC e ao produzir sons batendo com os dedos dobrados contra um painel de argamassa armada do edifício em referência, declarou debochando e com cara de “conteúdo técnico”: — Vejam, o material não é acústico!

Incursões e especulações desta natureza ocorreram com freqüência no período e não merecem sequer serem rebatidas, mas o fato é que a tecnologia da argamassa armada naquele momento, após 35 anos de sua introdução e desenvolvimento através do trabalho profícuo do Grupo de São Carlos, saiu irremediavelmente arranhada do episódio CIACs.

Retomar aqui o conceito de adequação tecnológica introduzido por Hanai, significa modestamente tentar buscar requalificar a discussão técnica a respeito das estruturas delgadas de concreto, da mesma forma como o notável engenheiro de estruturas espanhol, José Antonio Fernández Ordóñez o vinha fazendo nos últimos anos de sua vida, conforme atesta o seu belíssimo livro sobre a obra de Eduardo Torroja, lançado em 1999, citado várias vezes no capítulo 2 do presente trabalho (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999).

Fernández Ordóñez deixa claro o seu ponto de vista quando afirma que não é por acaso que o concreto protendido de Freyssinet e as estruturas laminares de concreto de Eduardo Torroja foram invenções concebidas nos anos 30 do século passado, em meio a um processo comum de “melhora da qualidade do concreto, de substituição da quantidade pela qualidade”.

A adequação tecnológica, por sua vez, segundo as palavras de Hanai, é o resultado de “um conjunto de decisões tornadas pelo agente executor de um projeto ou de uma obra, as quais devem estar suficientemente instrumentadas —a seu devido tempo e nível de decisão— pelo conhecimento ou domínio das tecnologias de construção e do campo onde se dará a intervenção” (HANAI, 1992).

Quais as razões que levaram, por exemplo, à escolha da tecnologia da argamassa armada para as intervenções pioneiras do arquiteto João Filgueiras Lima em 1980, nas obras de urbanização de favelas de Salvador-BA? Quais as justificativas para a adoção da tecnologia da argamassa armada para obras da mesma natureza executadas pela EMURB, em São Paulo, 10 anos depois?

O arquiteto Filgueiras Lima, ou Lelé, como é mais conhecido, entrevistado por Hanai declara que “os técnicos defrontam-se com questões profissionais que envolvem riscos a serem assumidos, não necessariamente decorrentes da adoção de tecnologias inovadoras, mas de situações em que os dados técnicos são insuficientes para um juízo menos sujeito a erros”. Dados sobre o terreno, a estabilidade das encostas, a eficiência das obras de contenção, a tipologia e a magnitude das ações. O técnico que projeta ou executa uma obra nessas condições, nas palavras de Lelé, com o intuito de melhorar as condições de segurança e utilização do terreno, pode adotar uma postura de assumir ou não a responsabilidade pela intervenção (HANAI, 1992).

Hanai, concordando com as palavras de Filgueiras Lima, afirma que “há sempre uma tendência no meio técnico de resguardo, de se contornar os problemas, às vezes por meio de superdimensionamento; entretanto, isso pode inviabilizar o empreendimento, principalmente no caso de grande repetitividade. Não havendo outras alternativas, as obras não são realizadas ou podem ser postergadas, o que também traz sérios prejuízos, notadamente, de caráter social” (HANAI, 1992).

Portanto, ao se estudar a utilização da tecnologia de pré-fabricação da argamassa armada no Brasil em passado recente, sobretudo na forma de obras de urbanização e saneamento básico executadas em assentamentos populacionais precários, é preciso perguntar qual a expectativa de vida útil para

estas obras e quais as outras alternativas tecnológicas para executá-las no mesmo prazo, com a mesma qualidade e aos mesmos custos.

Inicialmente, os sistemas construtivos propostos para as urbanizações de favelas, seja em Salvador (1980) seja em São Paulo (1990), são compostos por peças com baixa massa unitária, passíveis de transporte e montagem manuais, indispensáveis devido às más condições de acesso aos locais. Cada uma das peças concebidas para urbanizar favelas foi detalhada de modo a tornar mais rápida a operação de montagem manual, através de operações de simples encaixe dos componentes entre si, sem uniões úmidas (moldadas no local) (CAMPOS, 1999).

Em segundo lugar, embora estas obras estivessem inseridas em programas para implantação de melhorias urbanas em assentamentos degradados ambientalmente, ou seja, obras não convencionais de caráter provisório, verifica-se com grande satisfação nos dias de hoje, que as obras da RENURB de Salvador, após mais de 20 anos, resistiram aos testes de durabilidade impostos pelo tempo e pelas condições agressivas de contato com os esgotos em natura, conforme o apresentado no capítulo 6 deste trabalho. Estas obras só não resistiram à falta de um programa social que comprometesse as populações beneficiadas com as melhorias executadas e, principalmente, à falta de uma manutenção periódica dos equipamentos urbanos pelo poder público, fato que não chega a ser uma surpresa no caso das cidades brasileiras.

No caso de São Paulo, a primeira canalização de córrego executada com pré-fabricados de argamassa armada na cidade, pela antiga fábrica da EMURB, no Córrego Mirangoaba – Freguesia do Ó, há quase 12 anos atrás, da mesma maneira resiste ao tempo e oferece condições de habitabilidade em uma antiga favela com o mesmo nome do córrego. Em visita feita ao local no mês de dezembro de 2001, sem o caráter de inspeção técnica detalhada, como naquela feita no âmbito da presente pesquisa em 1999 nas obras de Salvador, fez-se uma rápida inspeção visual nas peças pré-fabricadas de argamassa armada, na qual se pôde observar a integridade dos componentes aí utilizados (figuras 10.1 e 10.2).



Figura 10.1 – Detalhe peças da canalização do Córrego Mirangoaba (1990)

A opção dos técnicos responsáveis nestes dois casos, tanto em Salvador como em São Paulo, como recomenda Hanai (HANAI, 1992), foi:

- assumir riscos que não causariam danos civis mais graves, considerando-se principalmente a pouca ou nenhuma informação sobre a geomorfologia dos terrenos onde se iria intervir; e
- desenvolver soluções construtivas que preservassem a técnica construtiva no seu mais elevado nível.

A partir dos resultados apresentados na presente pesquisa para as matrizes de alto desempenho que aqui se adotou chamar de “microconcreto de alto desempenho”, por certo caem por terra alguns dos argumentos contrários ao emprego em larga escala dos elementos pré-fabricados delgados de concreto. No entanto, os tipos de obras e situações em que este tipo particular de concreto encontra a sua melhor aplicação e proporciona resultados de boa qualidade e de custo competitivo continuam sendo os mesmos. Obras que exijam leveza, flexibilidade de formas e elevado desempenho mecânico, dentre outras

características, são motivos suficientes para um estudo de adequação desta alternativa tecnológica.



Figura 10.2 – Vista geral da canalização do Córrego Mirangoaba (1990)

A OPÇÃO PELA ANÁLISE PETROGRÁFICA

A durabilidade do concreto pode ser definida como sendo a sua capacidade de oferecer um comportamento adequado ao longo da vida útil do elemento estrutural a que constitui (GÁLLIGO e ALAEJOS, 1990).

Embora o concreto também possa ser afetado por agentes internos, na medida em que no capítulo 8 já foi apresentada a forma mais adequada de

escolha dos materiais de modo a evitar problemas desta natureza, as considerações aqui expostas sobre a durabilidade do microconcreto de alto desempenho farão referência somente aos agentes agressivos externos, mais especificamente, ao transporte de fluidos através da matriz.

Cabe ressaltar que são três os fluidos mais importantes que podem afetar a durabilidade do concreto: água, pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono e oxigênio. A penetração no concreto pode ocorrer através do escoamento do líquido ou do gás no interior da matriz cimentícia, o que caracteriza a permeabilidade propriamente dita, mas também por difusão e adsorção. Apesar disso, todo deslocamento depende basicamente da estrutura da pasta de cimento hidratado (NEVILLE, 1997).

Neville destaca que a facilidade com que os fluidos, tanto líquidos como gases, podem penetrar no concreto e se deslocar no seu interior é habitualmente chamada de permeabilidade, mas a rigor a permeabilidade refere-se somente ao escoamento de um fluido através de um meio poroso (NEVILLE, 1997). Embora o que importe realmente saber seja a “penetrabilidade” do concreto, Neville admite o uso genérico da expressão “permeabilidade”, para designar o deslocamento dos fluidos em geral no concreto.

Sendo assim, para que um concreto resista a agentes químicos agressivos é necessário reduzir a sua porosidade e permeabilidade de modo a eliminar ou pelo menos diminuir a velocidade dos efeitos deletérios daí provenientes (AÏTCIN, 1998). Obter uma matriz o mais compacta e impermeável possível é, portanto, uma meta a ser perseguida obstinadamente, já que um concreto resistente não significa necessariamente um concreto durável.

Manter uma baixa relação água/aglomerante para se chegar a um concreto de alto desempenho, neste caso, tem como objetivo primordial não uma elevada resistência à compressão, mas sim o controle da sua permeabilidade e, conseqüentemente, da sua durabilidade.

Nas palavras de Aïtcin: “Se a relação água/aglomerante necessária para atingir o nível de impermeabilidade desejado leva a uma alta resistência à compressão, é responsabilidade do projetista usar essa resistência adicional mais

eficientemente. No futuro, o concreto de alto desempenho será usado não tanto por sua alta resistência à compressão, mas sim pela sua maior durabilidade”.

Tendo em vista a necessidade de se correlacionar as propriedades mecânicas de resistência à compressão das matrizes desenvolvidas, com uma avaliação qualitativa das suas respectivas porosidades, buscou-se desenvolver no decorrer da pesquisa uma metodologia para estudo dos aspectos mais diretamente relacionados à durabilidade, de modo a melhor poder caracterizá-las.

O projeto de pesquisa, inicialmente, previa que seriam executados ensaios de porosidade com as matrizes obtidas nas séries de ensaios. Sabe-se que a permeabilidade à água do concreto usual, por exemplo, diminui à medida que a relação água/aglomerante decresce, até que essa relação aproxime-se de 0,40. Porém ao se atingir essa relação água/aglomerante, definida genericamente por Aitcin (AİTCIN, 1998) como a fronteira entre o concretos usuais e os concretos de alto desempenho, normalmente, passa a ser uma tarefa difícil registrar qualquer fluxo significativo de água através de uma amostra de concreto, mesmo aplicando-se uma alta pressão.

Isso não significa que não existam mais capilares interligados dentro do concreto, mas sim que a água não pode se mover através deles devido à sua finura. A lei de Darcy passa a não ter a mesma validade e as forças elétricas e capilares desenvolvidas dentro dessa rede de finos poros são fortes o bastante para se contraporem às grandezas usuais de pressão usadas quando se mede a permeabilidade à água (AİTCIN, 1998).

Como a maioria dos concretos de alto desempenho tem uma relação água/aglomerante inferior a 0,40, não é possível avaliar o grau de interconexão da rede de poros existente, tentando forçar a água a fluir através deles. Entretanto, seria impróprio afirmar que os concretos de alto desempenho são impermeáveis, pois mesmo que a água não possa percolar nessa rede interligada, íons agressivos o podem, visto que pressões osmóticas conseguem ser fortes o bastante para fazer esses íons se moverem através do concreto de alto desempenho.

Assim, a resposta para uma avaliação completa da permeabilidade pode ser também a técnica já usada na tecnologia do concreto, contida na norma

AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials, denominada T 277-81 - “Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete”¹, ou sua equivalente na ASTM-American Society for Testing and Materials, denominada C 1202-97 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration”².

O ensaio é bem aceito para o concreto usual e já vem sendo adotado por muitos dos pesquisadores interessados em avaliar a permeabilidade do concreto de alto desempenho, na medida em que há uma forte correlação entre a relação água/aglomerante e a permeabilidade aos íons cloreto no concreto de alto desempenho.

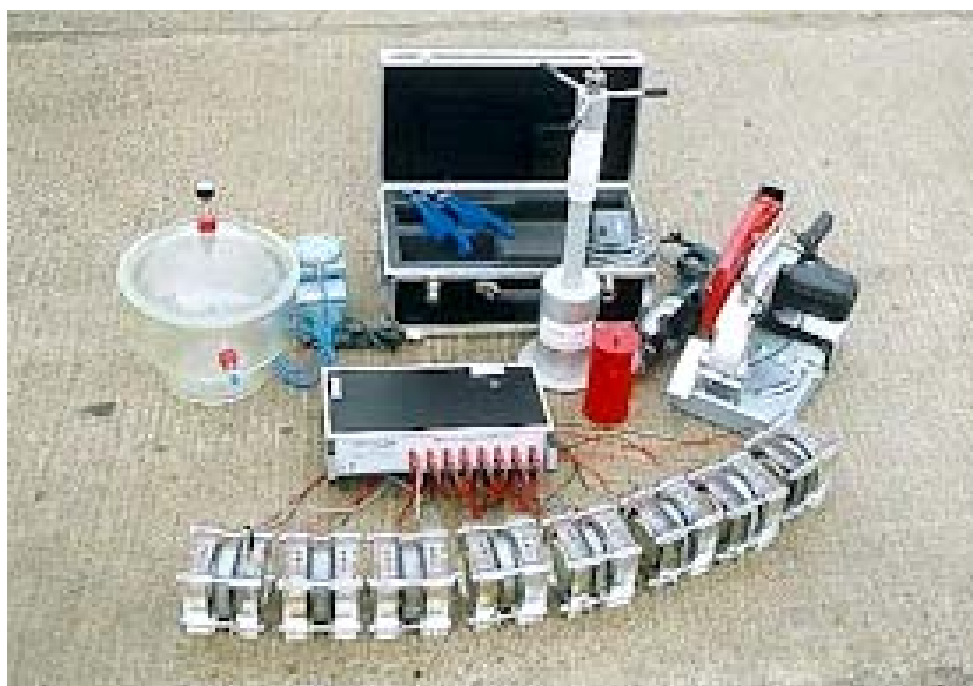


Figura 10.3 – Aparato para ensaios de difusividade de íons cloreto no concreto

Neste tipo de ensaio uma amostra do concreto cuja permeabilidade deve ser verificada, é obtida a partir do corte de um corpo-de-prova na forma de um

-
- 1 Determinação rápida da permeabilidade do concreto aos cloretos.
 - 2 Método de ensaio para a indicação elétrica da capacidade do concreto para resistir a penetração de íons cloreto.

disco delgado, com um diâmetro de 4” ou 100 mm e uma espessura de 2” ou 50 mm. O corpo-de-prova para ensaio é então posicionado no centro de uma célula feita de PMMA-Polimetilmetacrilato (Plexiglas) contendo duas câmaras (reservatórios de fluidos), posicionadas uma de cada lado da amostra. Uma câmara é preenchida com uma solução de 3% em massa de cloreto de sódio em água destilada, enquanto a outra recebe uma a 0.3 N de uma solução de hidróxido de sódio também em água destilada. Normalmente, uma tensão de 60 V é aplicada entre o pólo negativo, conectado na câmara contendo a solução de NaCl, e o pólo positivo da solução de NaOH.

Os íons de cloreto carregados negativamente na solução de NaCl passarão a migrar através da amostra em direção ao pólo positivo, conseqüentemente aumentando a corrente. O concreto em estudo será tanto mais permeável quanto mais íons migrarem de uma câmara para outra em um determinado período de tempo, estabelecendo assim um nível mais elevado de corrente elétrica.

A corrente é medida durante 6 horas. Os resultados do ensaio são apresentados em Coulombs, produto da corrente pelo tempo decorrido, indicando, portanto, a maior ou menor resistência à penetração dos íons cloreto no concreto para uma tensão 60 V DC. Na tabela 10.1 é apresentada uma classificação de permeabilidade aos íons cloretos segundo a norma ASTM C 1202-97, baseada nos trabalhos de Whiting (WHITING, 1981).

Tabela 10.1 – Classes de permeabilidade aos íons cloreto

CARGA (Coulombs)	CLASSE DE PERMEABILIDADE	REFERÊNCIAS
>4000	Alta	Relação a/a >0.5
4000-2000	Moderada	Relação a/a de 0.4-0.5
2000-1000	Baixa	Relação a/a <0.4
1000-100	Muito baixa	Concreto com látex
<100	Desprezível	Concreto polímero

Um sistema completo compreende:

- os acessórios/equipamentos para moldagem dos corpos-de-prova e corte das amostras;
- equipamentos para secagem à vácuo (para amostras úmidas) e bomba de vácuo para saturação das amostras;
- células de plexiglas;
- uma placa e um microprocessador para a montagem de um sistema automático de aquisição de dados, com no mínimo 12 canais e um programa de computador específico;
- uma fonte DC 60 V de alta qualidade, baixo *ripple* e sem ruídos, com níveis variáveis de tensão de 10, 20, 30, 40 e 50 V.

A placa de aquisição de dados com 12 canais permitirá a realização de até 6 ensaios simultaneamente, convertendo os sinais analógicos provenientes dos sensores, em sinais digitais, de modo a poderem ser tratados pelo microcomputador através de um programa adequado.

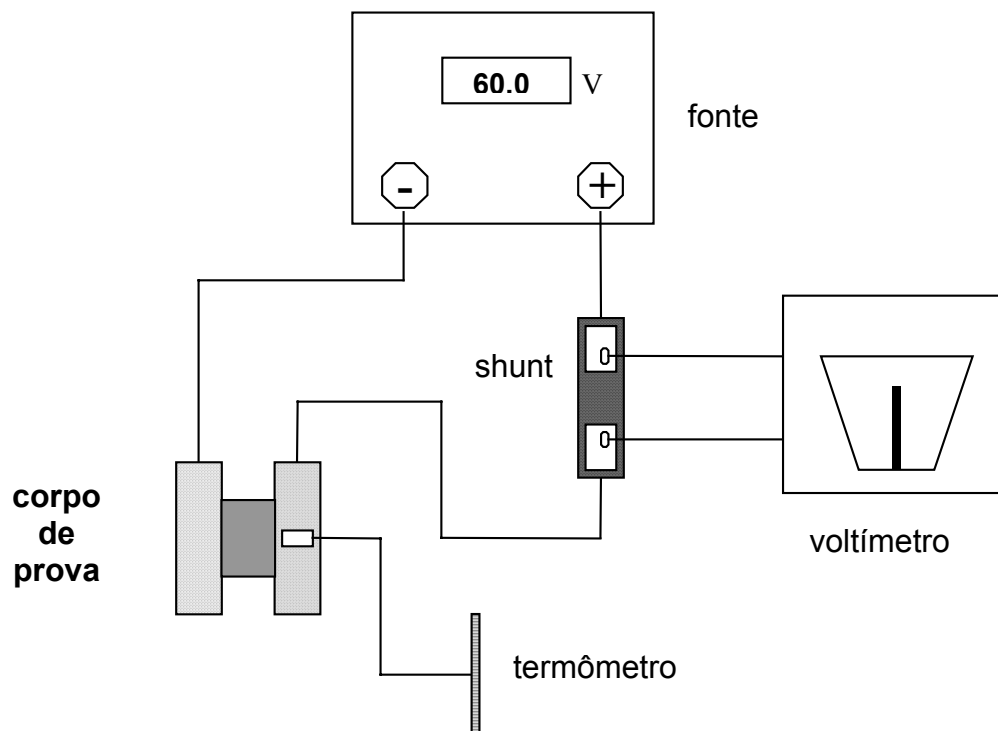


Figura 10.4 – Dispositivo sem automação para ensaios de difusividade

Importante esclarecer que este tipo de ensaio, antes da sua automação, empregava um voltímetro (milivolts), para leitura da tensão obtida a partir de um *shunt* de corrente, e um termômetro, para medir a temperatura no interior da célula. Os dispositivos envolvidos em um ensaio consistiam basicamente no esquema apresentado na figura 10.4.

Já os sistemas mais sofisticados empregados atualmente para o ensaio em referência permitem:

- estabelecer individualmente o tempo de ensaio para cada célula, com leituras a cada 5 minutos (o tempo mínimo especificado pela norma ASTM C 1202-97 é de 30 minutos);
- registrar a temperatura na câmara de NaCl, interrompendo o ensaio para temperaturas superiores a 90°C;
- ensaiar mais de 8 células simultaneamente para uma mesma voltagem;
- controlar as operações através de um microcomputador empregando o programa Windows, de modo a compatibilizar a documentação gerada a partir dos resultados de cada ensaio com outros programas usualmente disponíveis no mercado.

Embora este ensaio seja aparentemente simples de ser realizado, acredita-se que o aparato requerido para se medir simultaneamente a permeabilidade aos íons cloreto nas multi-células, em pelos menos quatro a oito amostras de uma vez, deve estar obrigatoriamente associado a um sistema automático e informatizado de aquisição de dados como aquele aqui descrito.

Devido a estas condições não poderem ser rigorosamente atendidas para a realização dos ensaios nos níveis quantitativos e qualitativos ideais, este pesquisador optou por outro recurso julgado mais adequado a seu tempo, face aos objetivos propostos no escopo da presente pesquisa: a análise petrográfica.

Tomando-se como base a contribuição positiva que a análise petrográfica poderia trazer ao estudo qualitativo da microestrutura dos microconcretos endurecidos obtidos, além da oportunidade da presença de especialistas nesta área no IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, optou-se pela petrografia para uma melhor e mais expedita forma de caracterizar a

durabilidade das matrizes obtidas. Em suma, buscou-se aquilo que poderia se chamar a grosso modo de "a imagem da durabilidade", através de um estudo visual comparativo das características da microestrutura dos três traços desenvolvidos.

O estudo petrográfico de microconcretos endurecidos possibilita a observação das feições relacionadas à pasta, ao agregado e aos vazios, tais como sua proporção relativa, bem como tipos de vazios (fissuras, poros, etc.).

Pouco tem sido publicado a respeito da utilização da análise petrográfica no estudo de argamassas e microconcretos no Brasil (OLIVEIRA, NASCIMENTO e CINCOTTO, 1999), o que evidencia um determinado grau de originalidade na incorporação deste tipo análise em pesquisas desta natureza.

A confecção de lâminas e as análises petrográficas foram realizadas no Laboratório de Petrologia e Tecnologia de Rochas do IPT, sob a supervisão da Dra. Geóloga Mirian Cruxên Barros de Oliveira, pesquisadora do Agrupamento de Engenharia de Rochas do mesmo instituto, seguindo as prescrições da norma da ASTM-American Society for Testing and Materials, denominada C 856-95 – “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete”³.

Acredita-se que tais estudos petrográficos podem levar a uma melhor fundamentação dos aspectos relacionados à durabilidade dos microconcretos obtidos, cuja resistência à compressão já apresentou resultados extremamente positivos.

A petrografia é uma técnica normalmente utilizada no estudo de rochas, consistindo na sua descrição (exame e avaliação da composição e estrutura) e classificação, de modo a possibilitar a avaliação de seu desempenho ou a previsão do seu comportamento quando colocada em serviço (OLIVEIRA et al., 1999).

Os aspectos de interesse no exame dos microconcretos e argamassas endurecidas em seções delgadas (ASTM C 856-95) são normalmente:

³ Procedimento para análise petrográfica do concreto endurecido

- Mineralogia, estrutura, tipo, variações ou homogeneidade;
- Tamanho dos grãos, classificação dos agregados grossos e finos;
- Presença de agregado manufaturado fino;
- Interface com a matriz;
- Fissuras e microfissuras no agregado e na matriz;
- Produtos de reação álcali-agregado (carbonatos e/ou sílica).

Tomando-se como base o texto da norma ASTM C 856-95, pode-se aqui afirmar que os objetivos da análise petrográfica dos corpos-de-prova de microconcreto moldados em laboratório no âmbito da presente pesquisa, são pesquisar os efeitos dos ensaios executados sobre as amostras ensaiadas ou sobre um ou mais de um dos seus constituintes, de modo a apresentar exemplos dos efeitos de um processo, provendo este pesquisador com evidências visuais de exemplos de reações na matriz, cujos materiais constituintes, as dosagens, as idades e os históricos são conhecidos.

Conforme esclarece a própria norma ASTM C 856-95, dentre as principais finalidades que pode cumprir a análise petrográfica do concreto empregado para a construção civil, encontram-se:

- A determinação do provável desempenho do concreto no futuro;
- A descrição da matriz cimentícia, incluindo a determinação qualitativa do tipo de aglomerante hidráulico empregado, grau de hidratação, grau de carbonatação se presente, evidência de deficiências no cimento, presença de adições minerais, a natureza dos produtos de hidratação, a adequação da cura e eventualmente uma elevada relação água/aglomerante da pasta;
- A possibilidade de exame de corpos-de-prova de concreto ou argamassa que tenham sido submetidos a condições de serviço, reais ou simuladas, para os vários usos previstos na construção civil;
- A pesquisa de produtos de concreto de qualquer espécie (blocos, componentes estruturais pré-fabricados, tubos e módulos construtivos), sob a forma de produtos ou amostras provenientes da produção regular, de

elementos em situação de serviço ou de componentes que foram submetidos a ensaios em condições de serviço, reais ou simuladas;

- A determinação dos efeitos dos processos de fabricação e as suas variáveis, tais como: procedimentos de mistura, moldagem, desforma, endurecimento, cura e manuseio, sobre as características finais do concreto;
- A determinação dos efeitos do uso de diferentes materiais constituintes, métodos de lançamento e procedimentos de desforma, tipos e quantidades de armadura, etc.;

Deu-se início à análise petrográfica através da separação de parte dos corpos-de-prova moldados para os ensaios de resistência nas três condições de estudo, a saber: Família de Traços I, Família de Traços II e Família de Traços III, da Série de Ensaios nº 2 – SE-2.

Através de operações de corte são retirados pequenos prismas dos corpos-de-prova, com dimensões aproximadas de 4,0 x 2,0 x 1,0 cm, os quais são posteriormente impregnados à vácuo com resina pigmentada na cor azul, de modo a possibilitar uma posterior visualização dos vazios macroscópicos e microscópicos, através de instrumento óptico.

A amostra é seca em estufa durante 24 horas, a uma temperatura de 60° C. Uma vez endurecida a resina pigmentada, as amostras adquirem então resistência mecânica suficiente para serem desbastadas e posteriormente coladas com resina a uma lâmina de vidro.

Procede-se então a mais um corte da amostra, a qual fica com aproximadamente 2 mm de espessura. A sobra do que foi cortado é guardada, constituindo-se num “testemunho” para auxiliar no estudo da seção delgada. Com o emprego de um disco abrasivo a plaqueta é então desgastada muito lentamente sobre a lâmina de vidro, até atingir a espessura de aproximadamente 50 µm. Posteriormente a seção delgada segue sendo lixada manualmente até alcançar a espessura final de 30µm. Por fim, a seção delgada é coberta com uma lamínula e colada com bálsamo do Canadá, ficando pronta para ser estudada.

A análise petrográfica inicia-se com o exame visual do material, seguido de observação sob lupa binocular, e finalizando com sua visualização ao microscópio óptico de luz polarizada, através da lâmina delgada confeccionada.

A técnica permite a obtenção de informações sobre os minerais constituintes: natureza, granularidade (tamanho de grão), tipo e grau de alteração e maneira como se dispõem e se interrelacionam; bem como sobre descontinuidades que possam interessar (poros, fissuras, fraturas, etc) conforme o caso.

A seguir são apresentadas as 4 situações de estudo (tabela 10.2), a partir das quais foram confeccionadas as lâminas delgadas para análise petrográfica do microconcreto.

Tabela 10.2 – Corpos-de-prova da série de ensaios nº 2-SE2 tomados para análise petrográfica

CORPOS DE PROVA			CARGA (kgf)	fc média (MPa)	CONDIÇÃO DE ESTUDO
C. P. Nº	TRAÇO	IDADE (dias)			
23	MÉDIO	28	12950	64,7	Família I
60	MÉDIO	28	14450	71,3	Família II
95	MÉDIO	28	19400	96,4	Família III
84	RICO	28	24000	119,9	Família III

Tomando-se uma determinada idade (182 dias), o critério inicialmente adotado para a escolha dos corpos-de-prova foi a sua representatividade com relação aos traços de microconcreto estudados, a saber:

- Família de TRAÇOS I – Traços de referência CEDEC/EMURB (1989-1993)
- Família de TRAÇOS II – Traços empregando aditivo superplastificante
- Família de TRAÇOS III – Traços empregando aditivo superplastificante mais adição de sílica ativa

Sendo assim, os corpos-de-prova números 23, 60 e 95, representam os traços de consumo médio de cimento, para as 3 condições de estudo.

O segundo critério, utilizado para a escolha do corpo-de-prova nº 84, baseou-se exclusivamente na resistência mecânica máxima obtida entre as matrizes do microconcreto ensaiadas à compressão.

Foram produzidas 4 lâminas delgadas, cujas imagens foram estudadas e registradas em 12 fotomicrografias, apresentadas nas figuras 10.5 a 10.16. As fotomicrografias foram feitas empregando-se um microscópio petrográfico marca Carl Zeiss, dotado de câmara fotográfica.

As imagens foram organizadas em pares, eqüivalendo a primeira fotomicrografia de cada par a um aumento aproximado de 25 vezes, contendo indicação da imagem subsequente em detalhe, enquanto a segunda eqüivale ao detalhe indicado na primeira imagem, aumentado de 100 vezes.

A tabela 10.3 apresenta uma síntese das observações a que se chegou a partir de cada imagem, sem no entanto abordar questões pertinentes à mineralogia dos agregados ou à química do cimento, ou ainda questões quantitativas, tais como dimensão de grãos e dos próprios vazios, na medida em que estes são dados conhecidos de antemão, para insumos escolhidos dentro de critérios rigorosos.

A partir de uma análise comparativa dos aspectos visuais das matrizes quanto à sua microestrutura e, particularmente, quanto à sua porosidade, pôde-se identificar a origem e a natureza dos vazios presentes em cada matriz cimentícia estudada. Especial atenção foi dada aos chamados vazios de interface, originados a partir da água livre na mistura, os quais constituem o que se convencionou chamar de “elo fraco” do concreto. Outros tipos de vazios, como ar incorporado e falhas provocadas por deficiências de aderência na interface pasta de cimento / agregado, também importantes, foram analisados.

Tabela 10.3 – Análise das lâminas dos microconcretos estudados

FIGURA	AUMENTO	OBSERVAÇÕES
10.5	25 X	<p>CP-23 da série SE-2 – Microconcreto de referência CEDEC/EMURB – Traço MÉDIO da Família de Traços I – relação a/a = 0,413</p> <p>Selecionada amostra de um corpo-de-prova já ensaiado à compressão, cuja resistência alcançou 64.7 MPa. Trata-se do microconcreto produzido segundo a configuração prevista na norma brasileira NBR-11.173, o qual apresenta condições razoáveis de durabilidade, segundo as inspeções e ensaios feitos na obras executadas – Capítulo 6.</p> <p>O tom ligeiramente azulado da amostra indica a microporosidade da matriz, exposta pela resina com pigmento azul impregnada na lâmina delgada.</p>
10.6	100 X	<p>CP-23 da série SE-2 – Detalhe da imagem apresentada na Figura 10.5, onde é possível verificar o caminho percorrido pela fissura na altura em que aplicou sobre o microconcreto a carga de compressão axial. A interface entre a matriz e os agregados representa o elo fraco da microestrutura do material, a partir de onde o colapso mecânico começou a se desenvolver.</p>
10.7	25 X	<p>CP-23 da série SE-2 – Aspecto da porosidade da matriz cimentícia, que apresenta na área analisada vazios provocados por ar incorporado, com a forma de circunferências preenchidas de azul ou branco, dependendo da presença ou não de resina no seu interior.</p>
10.8	100 X	<p>CP-23 da série SE-2 – Imagem mostrando em detalhe a porosidade da matriz cimentícia para o microconcreto com relação a/a = 0,413.</p>
10.9	25 X	<p>CP-60 da série SE-2 – Microconcreto Traço MÉDIO da Família de Traços II – relação a/a = 0,35 e uso de superplastificante</p> <p>O microconcreto em referência, quando ensaiado à compressão, alcançou uma resistência 71.3 MPa.</p> <p>Na imagem é perceptível a aproximação entre os agregados, na medida em que há menos água livre na mistura, em decorrência da diminuição da relação a/a, possível em função do emprego de aditivo superplastificante. Neste traço também houve uma diminuição no consumo de cimento, conforme apresentado na Tabela 9.5.</p> <p>O tom azulado praticamente desaparece quando comparada a matriz do Traço I, comprovando a diminuição da porosidade.</p>

Tabela 10.3 – Análise das lâminas dos microconcretos estudados

(continuação)

FIGURA	AUMENTO	OBSERVAÇÕES
10.10	100 X	<p>CP-60 da série SE-2 – Microconcreto Traço MÉDIO da Família de Traços II – relação a/a = 0,35 e uso de superplastificante</p> <p>Detalhe da imagem anterior confirmando as características já apontadas de menor porosidade.</p>
10.11	25 X	<p>CP-60 da série SE-2 – Zona mais porosa da matriz, onde os agregados foram arrancados por ocasião do lixamento manual durante a confecção da lâmina delgada, daí a grande mancha azul, representando o vazio deixado pelos grãos de areia.</p>
10.12	100 X	<p>CP-60 da série SE-2 – Detalhe de uma zona mais porosa da matriz cimentícia.</p>
10.13	25 X	<p>CP-95 da série SE-2 – Microconcreto Traço MÉDIO da Família de Traços III – relação a/a = 0,33, com uso de superplastificante mais adição de sílica ativa</p> <p>O microconcreto em referência, quando ensaiado à compressão, alcançou uma resistência 96.4 MPa.</p> <p>Através da imagem é possível perceber como a microestrutura do microconcreto em referência é absolutamente fechada, na medida em que já não há sinais de água livre na mistura, imperceptíveis com o uso de microscópio óptico.</p> <p>A presença da adição de sílica ativa cumpre um papel de “filler”, ao mesmo tempo que há uma aproximação maior ainda entre os agregados, na medida em que diminuiu ainda mais a água livre na mistura, em decorrência da diminuição da relação a/a, possível em função do emprego de aditivo superplastificante.</p> <p>O tom escuro característico desta e de outras matrizes contendo sílica ativa é função do carbono contido no produto hoje oferecido no mercado brasileiro.</p>
10.14	100 X	<p>CP-95 da série SE-2 – Detalhe da imagem anterior confirmando as mesmas características já apontadas de baixíssima porosidade.</p>
10.15	25 X	<p>CP-95 da série SE-2 – Como curiosidade, observa-se nesta imagem o agregado constituído por xisto, junto do qual há um vazio (interface) provocado por ar incorporado.</p>
10.16	100 X	<p>CP-95 da série SE-2 – Detalhe mostrando a bolha de ar incorporado e alguma microporosidade na interface pasta-agregado constituído por xisto.</p>

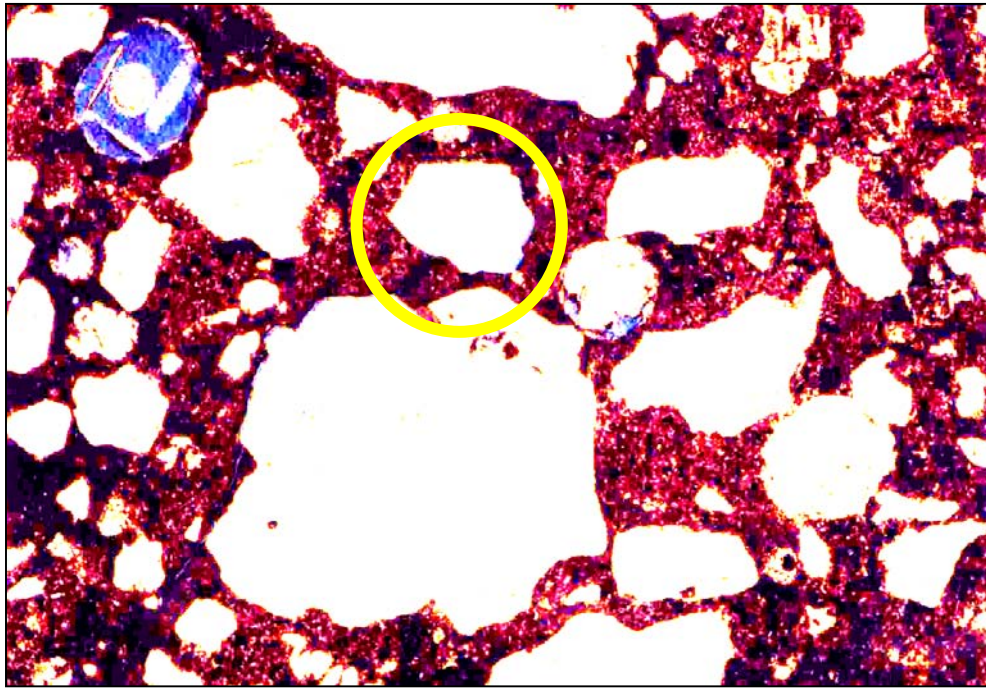


Figura 10.5 – Fotomicrografia da amostra CP-23 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 25 vezes

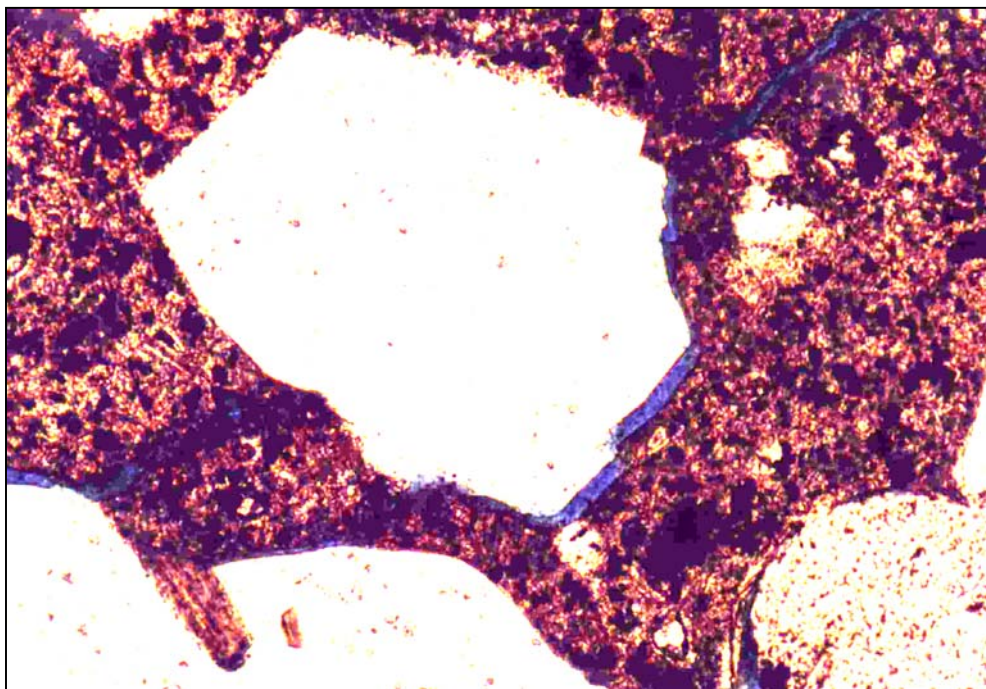


Figura 10.6 – Fotomicrografia da amostra CP-23 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 100 vezes (igual à Figura 7.2)

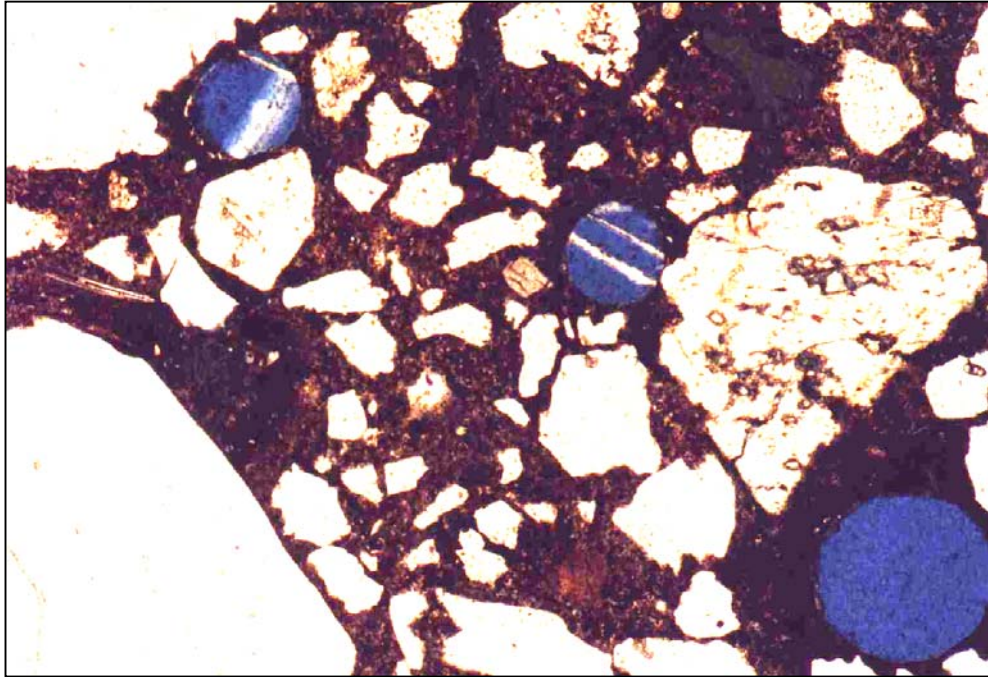


Figura 10.7 – Fotomicrografia da amostra CP-23 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 25 vezes

Figura 10.8 – Fotomicrografia da amostra CP-23 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 100 vezes



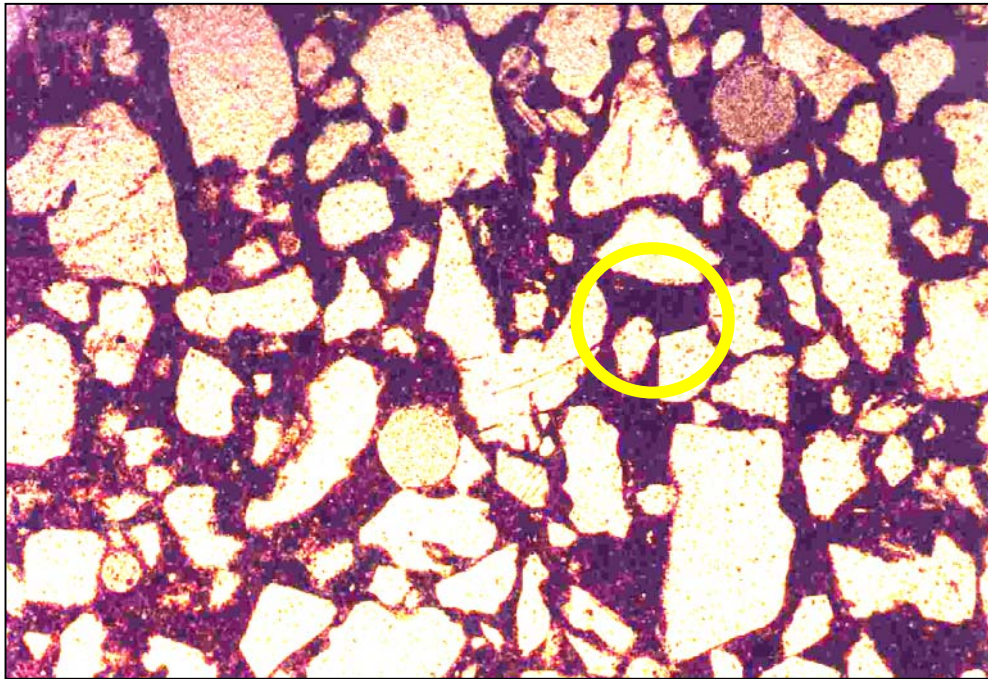


Figura 10.9– Fotomicrografia da amostra CP-60 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 25 vezes

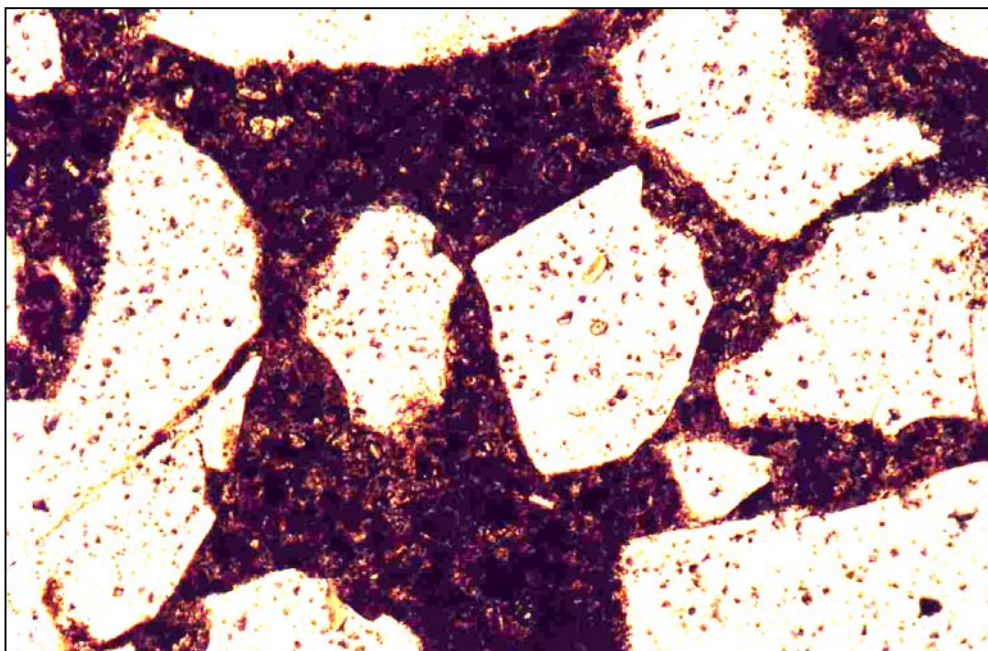


Figura 10.10 – Fotomicrografia da amostra CP-60 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 100 vezes

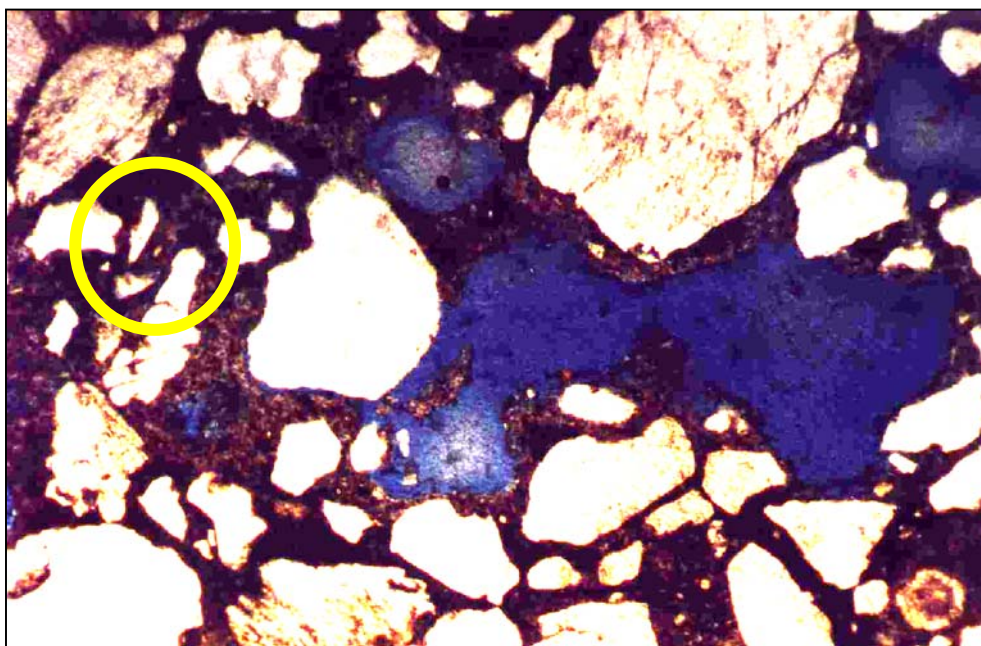


Figura 10.11– Fotomicrografia da amostra CP-60 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 25 vezes

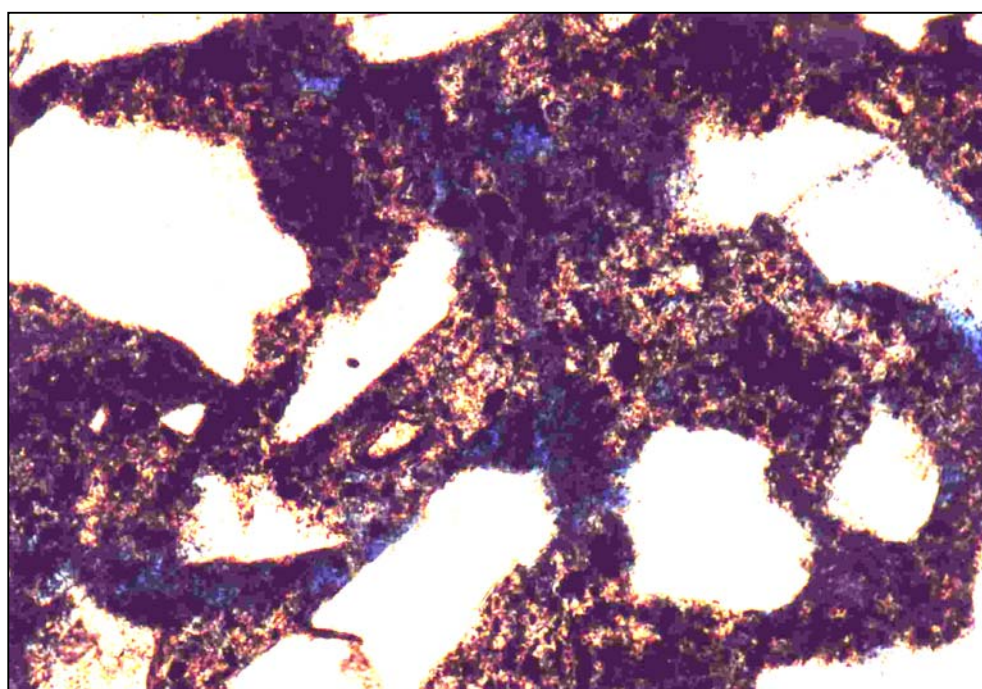


Figura 10.12– Fotomicrografia da amostra CP-60 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 100 vezes

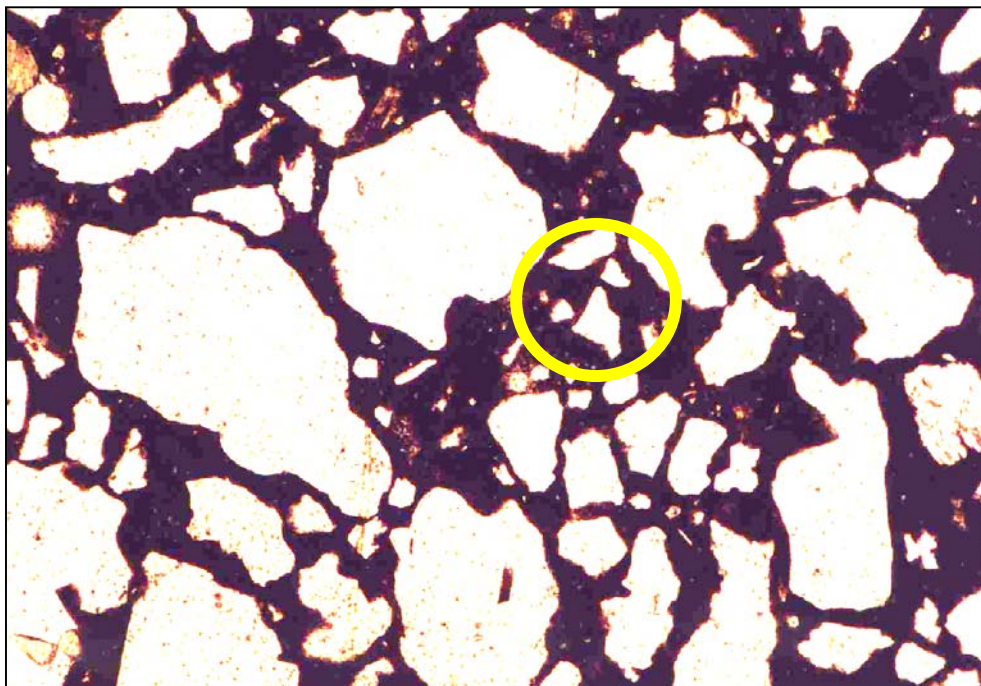


Figura 10.13 – Fotomicrografia da amostra CP-95 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 25 vezes

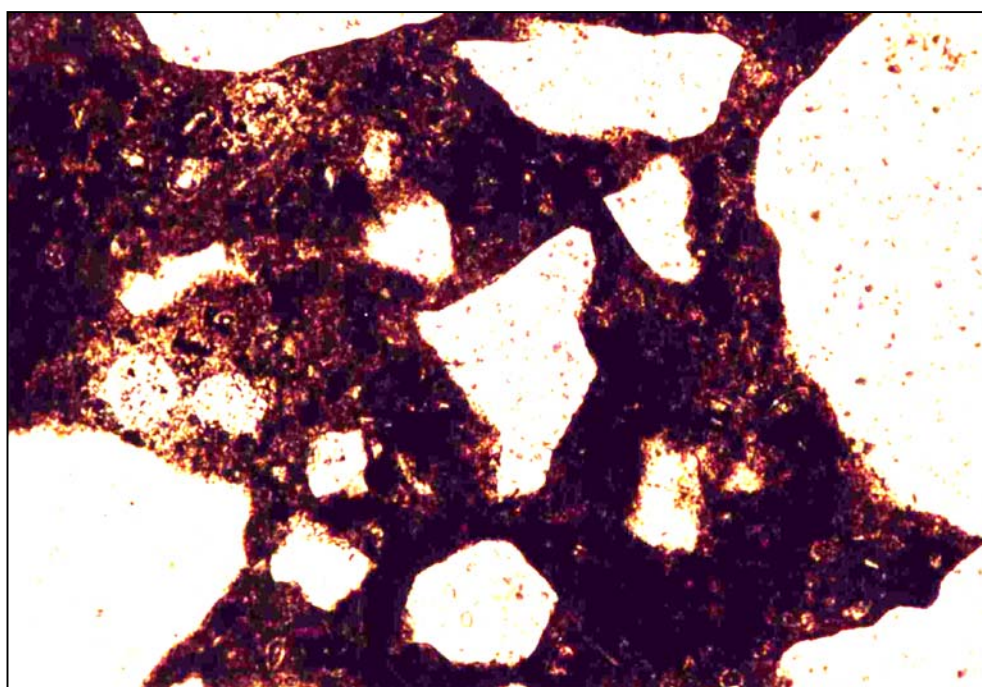


Figura 10.14 – Fotomicrografia da amostra CP-95 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 100 vezes

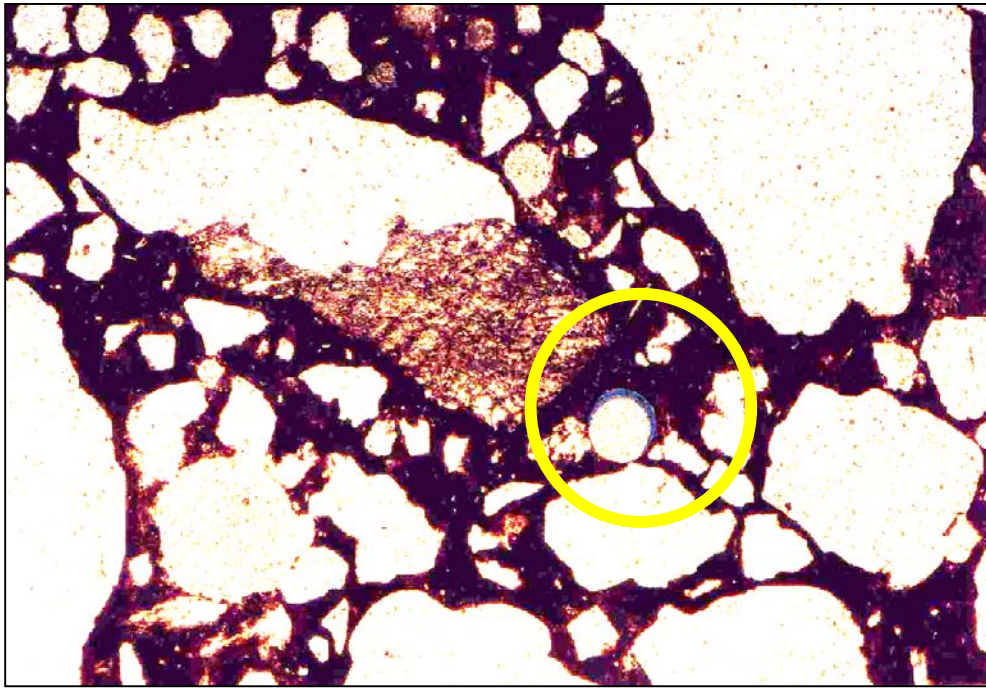


Figura 10.15 – Fotomicrografia da amostra CP-95 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 25 vezes

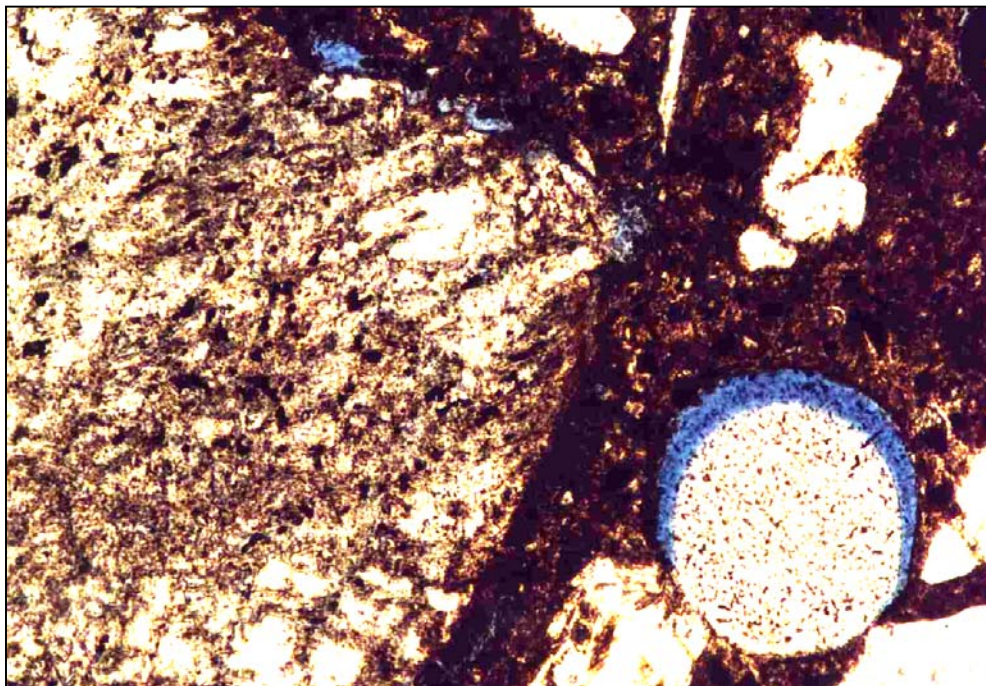


Figura 10.12– Fotomicrografia da amostra CP-95 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 100 vezes

Em destaque, a última fotomicrografia (figura 10.17) apresenta com um aumento de 100 vezes a matriz do microconcreto que alcançou a resistência de 119,9 MPa. Trata-se do corpo-de-prova nº 84, CP-84, com nível de consumo de cimento RICO e relação a/a de 0,235. A imagem também não deixa dúvida de como a microestrutura do microconcreto em referência é absolutamente fechada, inexistindo sinais de água livre, já que praticamente somente a água necessária para a hidratação do cimento tomou parte na mistura. A presença da adição de sílica ativa, além de cumprir a função de material cimentício suplementar, também funciona como um “filler”, conferindo maior compacidade e um tom escuro característico à mistura, em função do teor de carbono do produto. A diminuição radical da relação a/a é possível graças ao emprego de aditivo superplastificante em teores mais elevados do que o habitual, 5% do líquido sobre a massa total de material cimentício (vide tabela 9.5).

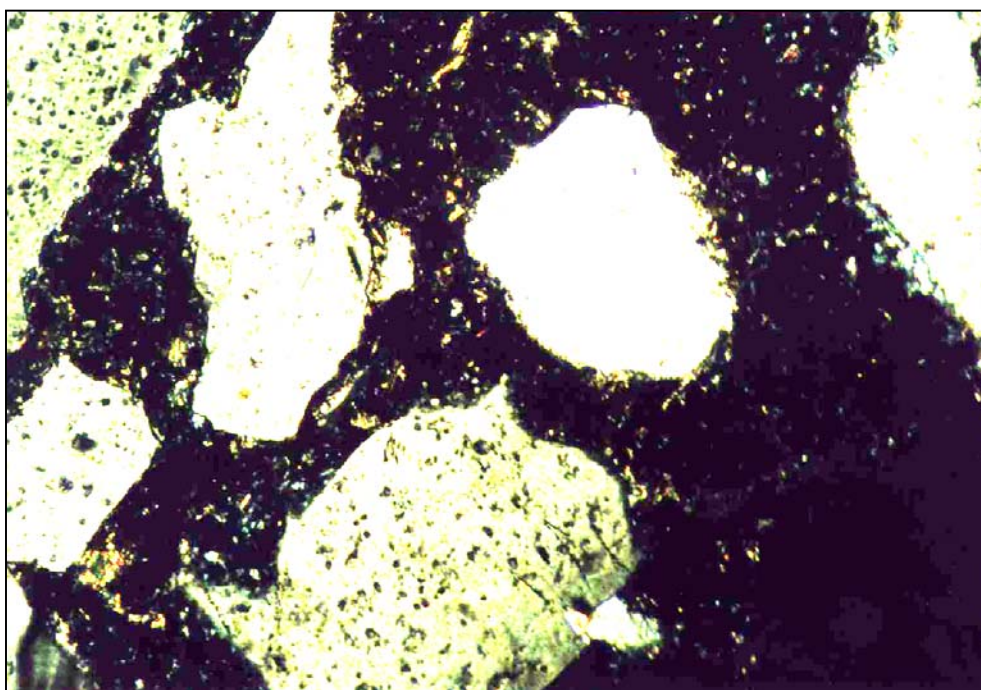


Figura 10.17– Fotomicrografia da amostra CP-84 obtida por microscopia óptica com nicóis paralelos com aumento aproximado de 100 vezes

A opção pela análise petrográfica na presente pesquisa, como meio de comprovação das características de elevado desempenho das matrizes desenvolvidas, sob o ponto de vista da durabilidade, apresentou consideráveis vantagens sobre outras técnicas de análise físico-química, na medida em foi possível a visualização quase que imediata dos resultados alcançados. O recurso da microscopia óptica por luz transmitida, com luz polarizada, permite que a microestrutura seja observada e descrita, da forma como se encontra na amostra de estudo, facilitando consideravelmente a atividade de desenvolvimento e inovação na área de tecnologia do concreto.

Em relação ao microscópio eletrônico, a grande vantagem da microscopia óptica é que ela segue os princípios do olho humano, tendo porém como principal limitação a escala de observação (OLIVEIRA et al., 1999). Trata-se de uma ferramenta adequada para visualização de grãos de tamanho médio variando de ± 2 cm a $20 \mu\text{m}$. Sendo assim, os grãos e partículas nestas dimensões são facilmente distinguíveis, tornando-se simples verificar no microscópio óptico uma determinada característica presumível a olho nu. Já o microscópio eletrônico trabalha com imagens geradas por dispersão de energia ou por retroespalhamento de elétrons, sendo portanto completamente distintas das imagens captadas pelo olho humano.

A técnica é pouco adequada para grãos menores que $5 \mu\text{m}$, o que dificulta a distinção de aglomerantes ou outras adições na pasta (OLIVEIRA et al., 1999). Acredita-se, no entanto, que para os microconcretos em estudo na presente pesquisa, a microscopia óptica executada em seção delgada do material seja suficiente para caracterizar a microestrutura do material.

A análise petrográfica de microconcretos endurecidos pode, portanto, orientar objetivamente as pesquisas que, como no caso presente, tenham por objetivo desenvolver matrizes de elevado desempenho, identificando os fatores que favoreçam a durabilidade das mesmas e contribuindo para a previsão e a prevenção de problemas futuros.

CAP. 11 – CONCLUSÕES

O conhecimento atualmente disponível sobre as propriedades do concreto de alto desempenho, relacionadas não só à sua alta resistência mas principalmente às suas condições de oferecer uma maior durabilidade às estruturas executadas com este material, traz consigo a oportunidade de revalidar e requalificar as premissas para o desenvolvimento da pré-fabricação leve à base de elementos delgados, na medida em que a melhora da qualidade do concreto representa a possibilidade efetiva de aplicação do conceito de substituição da quantidade pela qualidade.

Conforme já visto no capítulo 2 deste trabalho, não foi por acaso que a protensão de Freyssinet e as estruturas laminares de Torroja foram invenções concebidas nos anos 30 do século passado, em meio a um processo comum de “melhora da qualidade do concreto, de substituição da quantidade pela qualidade” (FERNÁNDEZ O. e NAVARRO V., 1999). A revolução que tais eventos representam é única em toda a história da construção, podendo ser associada à posterior aplicação massiva da pré-fabricação na Europa, ocorrida 20 anos depois, no período de reconstrução do segundo pós-guerra.

Pois bem, se o desenvolvimento do concreto de alto desempenho tem permitido a execução de edifícios de grande altura cujas estruturas são cada vez mais esbeltas, com lajes menos espessas e pilares mais delgados, há que se reconhecer as reais possibilidades oferecidas por esta tecnologia para o desenvolvimento da pré-fabricação em geral, onde a busca de otimização na relação da massa dos componentes construtivos sobre o metro quadrado de construção, é uma constante.

Dentro da engenharia de estruturas, define-se elemento laminar como sendo aquele em que duas de suas dimensões predominam em relação a uma terceira. Podem ser placas, cascas, membranas ou outros elementos estruturais delgados, cuja pequena espessura acaba por exigir uma maior complexidade na forma quando se busca a resistência.

Ao caracterizar um componente pré-fabricado laminar de microconcreto em função da sua pequena espessura (20mm em média), o que lhe confere uma

menor massa, fica estabelecida uma condição essencial para o emprego desta tecnologia: o uso indispensável do concreto de alto desempenho.

O título proposto para o presente trabalho, qual seja "Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: perspectivas de desenvolvimento para elementos pré-fabricados delgados" partiu do princípio que, embora as estruturas delgadas ou laminares de concreto armado, sejam elas de ferrocimento, de argamassa armada ou de microconcreto armado, venham sendo utilizadas na pré-fabricação há mais de 100 anos, claro está que há determinadas restrições que impuseram um limite ao desenvolvimento desta tipologia construtiva na última década.

O novo conhecimento em tecnologia da arquitetura que este trabalho pretende consolidar, apoia-se na comprovação das propriedades de elevado desempenho das matrizes de microconcreto obtidas, capazes de conferir maior valor agregado e "densidade tecnológica" aos sistemas e componentes construtivos pré-fabricados leves de concreto.

Cumpra aqui também ratificar e mais uma vez defender a designação "microconcreto de alto desempenho", como expressão escolhida para designar as matrizes cimentícias desenvolvidas.

Alguns poderão criticar com rigor etimológico a palavra "microconcreto", argumentando que embora seja esta uma expressão já utilizada por boa parte do meio técnico, o prefixo "micro", vindo do grego *mikrós*, é um elemento morfológico que designa pequeno.

No entanto, o que é "ferrocimento"? Ou, o que é "argamassa armada"? No Brasil, o termo "ferrocimento" consagrou-se na prática para designar as aplicações artesanais desta técnica. O seu emprego está voltado para pequenas construções, tais como cisternas e silos, além de componentes construtivos leves, porém sempre produzidos manualmente e, geralmente, sem o uso de fôrmas. Vários exemplos de construções, e até mesmo de embarcações, executadas com o ferrocimento, podem ser apreciados no livro de Hanai intitulado "Construções de argamassa armada; fundamentos tecnológicos para projeto e execução" (HANAI, 1992).

Já a expressão “argamassa armada”, cunhada pelo “Grupo de São Carlos” da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, serviu para classificar o material desenvolvido a partir de 1960 no Brasil, inspirado no *ferro-cimento* de Nervi, conforme apresentado no capítulo 1. Alguém poderia associar esta nova terminologia aplicada ao material a um mero capricho dos pesquisadores e professores da EESC-USP. No entanto, sabe-se que o ferrocimento ao ser introduzido no Brasil deixou de ser considerado um material composto e sinérgico tal como Nervi o havia concebido, convertido que foi num tipo especial de concreto armado, material associado, na medida em que foram diminuídas drasticamente as suas taxas de armaduras e o seu consumo de cimento. Sendo assim, cabia de fato uma diferenciação, até mesmo didática, entre os dois materiais, a partir de distintas designações.

Sobre os termos “microconcreto” e “de alto desempenho”, escolhidos por este pesquisador para designar as matrizes cimentícias de alto desempenho aqui preconizadas, pode-se citar por um lado as palavras de Hanai, que segue sendo uma das maiores autoridades em matéria de tecnologia da argamassa armada no país e no cenário internacional, e diz: “... a partir da definição do conhecido concreto, pode-se dizer que a argamassa é um concreto sem agregado graúdo, um tipo de ‘microconcreto’” (HANAI, 1992).

Por sua vez a designação “de alto desempenho” justifica-se não só pelos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples, que superaram os 110 MPa, mas também pela baixa relação água/aglomerante empregada neste caso, cujo objetivo primordial não é alcançar uma elevada resistência à compressão, mas sim diminuir ao máximo a permeabilidade das matrizes cimentícias resultantes, favorecendo conseqüentemente a durabilidade.

Assim sendo, a expressão “microconcreto de alto desempenho” é aqui utilizada para diferenciar a matriz cimentícia de alto desempenho a que se chegou, das matrizes usuais da argamassa armada. Apesar do fato de que poderia haver uma outra designação mais correta de um ponto de vista científico e etimológico, acredita-se que a escolha feita por este pesquisador despertará muito menos dúvidas e, por certo, mais interesse pelo tema, considerando-se as expressões já consagradas no meio técnico e no mercado.

NEM TUDO O QUE RELUZ É OURO

Nem tudo que vem sendo produzido no Brasil sob a designação “argamassa armada” de fato o é. Esta é a conclusão a que se pôde chegar após a realização de inspeções técnicas, entre julho de 1998 e fevereiro de 1999, a algumas das obras que aparentemente empregaram a mesma tecnologia nos últimos 20 anos, conforme apresentado no Capítulo 6 deste trabalho.

A ruína parcial de obras como a escola municipal “Prof. José Arapiraca”, em Salvador-BA, apresentada naquele capítulo e cujas peças de “argamassa armada” foram fabricadas pela FAEC-Fábrica Equipamentos Comunitários de Salvador em 1989, demonstra que não só a agressividade da névoa salina, constante no local, mas também a matriz excessivamente porosa e o alto índice de fissuração das peças, produziram circunstâncias mais do que propícias para um processo acelerado de deterioração, culminando neste caso particular, com a condenação de boa parte do edifício em menos de 10 anos.

Conforme já dito no capítulo 6 deste trabalho, neste edifício escolar a maior evidência existente de despassivação das armaduras é o próprio processo de corrosão, visível a olho nu, indicando espessuras de carbonatação superiores aos cobrimentos.

Na medida em que a FAEC funcionou em um período em que praticamente ainda não se encontrava à disposição a norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada” (ABNT, 1990), de 1987 a 1989, poderia se cogitar o desconhecimento de alguns preceitos básicos ali contidos, tais como a necessidade de se empregar um baixo fator água/cimento, limitado pelo documento normativo a uma relação de 0,45.

Ao se inspecionar o edifício do CTRS-Centro de Tecnologia da Rede Sarah, construído em 1993, mais uma vez se verificou uma porosidade excessiva da matriz usada na fabricação dos painéis externos inspecionados, decorrendo daí uma facilidade à penetração de fluidos e as suas respectivas conseqüências deletérias sobre a vida útil das peças. Tal característica ficou evidente após a verificação das espessuras de carbonatação nas peças mais expostas ao tempo, em geral próximas a 5mm, nos painéis exteriores examinados. Na medida em que os cobrimentos nominais das peças são eqüivalentes a 6mm, os riscos de

ocorrência de corrosão das armaduras já existiam à época das inspeções realizadas.

Conforme já afirmado no capítulo 6 deste trabalho, estas condições puderam ser comprovadas através da leitura de relatórios de ensaios obtidos no CTRS, nos quais constam os traços utilizados em peças como divisórias, paredes, peças para passarelas de pedestres e painéis para muros. Nestes traços o fator água/cimento indicado variava de 0,52 a 0,54. Aitcin afirma exaustivamente que qualquer concreto com uma relação água/aglomerante superior a 0,5 é um concreto com uma microestrutura muito aberta e que oferece "largas avenidas para a penetração dos agentes agressivos" (AÏTCIN, 1998).

A norma brasileira de "Projeto e execução de argamassa armada" não deixa dúvida quanto ao fator água/cimento máximo a ser empregado na produção de peças de argamassa armada, equivalente a 0,45. O fundamento tecnológico que restringe a relação água/cimento reside no fato de ser este o principal parâmetro que determina as propriedades de resistência e durabilidade do concreto, em função da porosidade da pasta de cimento hidratada, tanto maior na medida em que se eleva a relação água/cimento ou água/aglomerante.

Fissuras provocadas por retração hidráulica também puderam ser observadas em peças de fechamento do edifício do CTRS, as quais "radiografaram" em muitas delas a malha soldada da armadura, provavelmente originadas em um processo de cura deficiente ou incompleto. É através destas aberturas que a frente de carbonatação avança pontualmente, possibilitando o surgimento de focos localizados de corrosão de armadura.

Por sua vez, tanto as obras da RENURB-Companhia de Renovação Urbana de Salvador (Escadarias drenantes, Salvador-BA, 1980) como as do CEDEC-Centro de Desenvolvimento de Equipamentos Urbanos e Comunitários da EMURB-Empresa Municipal de Urbanização (Cetet-Oeste, São Paulo-SP, 1993) podem ser agrupadas em função da classificação quanto ao nível de danos observados. Apesar da agressividade dos ambientes onde estão localizadas, tanto na obra da EMURB como nas escadarias drenantes da RENURB, as verificações das espessuras de carbonatação nas peças pré-fabricadas de argamassa armada sempre apresentaram valores inferiores a 1mm. Isso equívale

a dizer que o cobrimento de argamassa nestas obras é menos poroso e está de fato protegendo as barras da armadura, mantendo as suas características de promotor da camada passivadora, ainda que com alguma carbonatação superficial, a qual não chega a 1mm após 20 anos —caso das escadarias drenantes da RENURB.

Daí a comprovação de que duas das principais causas da corrosão das armaduras de aço na argamassa armada são: a relação água/cimento elevada e os procedimentos deficientes de cura. Esses problemas, no entanto, podem ser equacionados sem a necessidade de se implementar soluções caras, tal e qual prescreve a própria norma NBR-11.173.

Portanto, pode-se aqui concluir que não é o marco temporal do ano de 1990, quando foi publicada a norma NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada”, que estabelece o “divisor de águas” entre obras feitas dentro dos melhores preceitos técnicos ou não. Tomando-se a norma brasileira, reafirma-se aqui que as obras podem e devem necessariamente ser divididas basicamente em:

- Obras executadas segundo a norma - aquelas que, realizadas após a publicação da NBR-11.173 ou que apresentem evidências ou registros documentais da aplicação de seus preceitos;
- Obras executadas fora de norma - em geral aquelas compreendidas no período arbitrado entre 1980 até 1990, quando inexistia o documento normativo, podendo estender-se às obras produzidas posteriormente à publicação da NBR-11.173, as quais apresentem evidências documentadas de não observância aos preceitos ali preconizados.

As características potenciais de elevado desempenho da argamassa armada, quando aplicada segundo a configuração prescrita na norma brasileira de “Projeto e execução de argamassa armada”, podem então ser associadas ao seu baixo fator água/cimento, limitado a 0,45.

Lançando mão uma vez mais da experiência de Adam Neville, sabe-se que para um concreto usual com uma relação água/cimento de 0,60, uma profundidade de carbonatação de 15mm é atingida após 15 anos, ao passo que

para uma relação 0,45 a mesma profundidade só é alcançada após 100 anos (NEVILLE, 1997).

Porém a redução da relação água/aglomerante da matriz cimentícia não é a única preocupação quando se quer obter uma peça pré-fabricada durável de microconcreto armado ou argamassa armada. Outros aspectos podem comprometer a durabilidade, particularmente o detalhamento construtivo das peças pré-fabricadas com armaduras metálicas.

A restrição às espessuras mínimas nominais de cobrimento praticadas a partir da norma NBR-11.173, na visão deste pesquisador, decorre muito mais das disposições construtivas das armaduras de aço, arranjos físicos e emendas, incompatíveis com as tolerâncias mínimas que seriam necessárias nos processos habitualmente empregados nas linhas de produção de pré-fabricados leves. Considerando-se, por exemplo, a espessura nominal de cobrimento indicada na norma brasileira, igual a 6 mm (tolerância de ± 2 mm) para ambientes não protegidos (exterior), tem-se um cobrimento mínimo que pode chegar a 4 mm.

Isso significa na prática que até mesmo as pontas de arame recozido, utilizado habitualmente para unir as telas e fios de aço das armaduras, caso não estejam dobradas cuidadosamente para o interior da peça, podem vir a se tornar o caminho para a corrosão das armaduras. Nas zonas de traspasse de fios e telas, o risco de não manutenção do cobrimento mínimo também é freqüente. Prova destas constatações provêm das mesmas inspeções a obras apresentadas no Capítulo 6 deste trabalho.

Nas obras executadas pela fábrica da EMURB (1989-1993) em São Paulo, segundo a norma NBR-11.173, não foram verificadas patologias generalizadas, mas sim pontos de corrosão localizados e passíveis de tratamento corretivo. Ou seja, de uma forma geral, a qualidade da matriz da argamassa, neste caso com um fator água/cimento entre 0,40 e 0,42, protegeu as armaduras e apresentou uma espessura de carbonatação inferior a 1 mm, após quase 10 anos. Os pontos de corrosão identificados localizavam-se em zonas de alta densidade de armaduras metálicas, especialmente nas vigas de cobertura, maiores peças do sistema construtivo empregado pela EMURB, com uma altura de 0,40 m e 5,625 m de comprimento.

Voltando à questão da qualidade da matriz cimentícia propriamente dita, ao se projetar o traço para o microconcreto de alto desempenho preconizado neste trabalho, tem-se a certeza de que a relação água/aglomerante será necessariamente baixa para se obter um concreto durável. Mas esta condição indispensável não é suficiente, já que etapas posteriores de produção, tais como o lançamento, o adensamento e a cura, também são partes fundamentais no processo de obtenção do microconcreto de alto desempenho.

Portanto, a exemplo do concreto, a durabilidade do microconcreto de alto desempenho é função das suas propriedades intrínsecas e da agressividade do meio ambiente a que será submetido, mas também será influenciada pelos detalhes construtivos, pelas condições de produção e pela cura.

NOVO CONHECIMENTO PRODUZIDO: A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

Ao se referir às limitações da tecnologia da argamassa, Hanai afirma que, com toda a certeza, um conjunto maior de informações sobre durabilidade constituiria “o mais poderoso agente definidor do efetivo potencial da tecnologia de estruturas delgadas”.

A partir da superação das dúvidas e da eliminação das restrições ao seu uso, a tecnologia ganharia novo impulso e seriam criadas novas especificações, estabelecendo-se limites para o emprego das “argamassas normais de cimento portland”, segundo o que prevê atualmente a norma brasileira NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada” (ABNT, 1990), ao mesmo tempo indicando-se a necessidade de desenvolvimento de matrizes cimentícias especiais, de alto desempenho, nas palavras de Hanai.

Consoantes com as preocupações e as indicações de Hanai, que também se encontram na origem desta pesquisa, pode-se concluir que as hipóteses inicialmente lançadas puderam ser comprovadas, na medida em que:

- a) A matriz da argamassa armada, da forma como é apresentada na norma NBR-11.173 de “Projeto e execução de argamassa armada” (ABNT, 1990), possui de fato características potenciais que podem ser associadas à tecnologia atual do concreto de alto desempenho, seja quanto à sua resistência mecânica seja quanto à sua microestrutura;

- b) Ao se empregar os aditivos superplastificantes como redutores de água nas matrizes de microconcreto, foi possível alcançar uma combinação de desempenho e economia extremamente positiva, incrementando a resistência mecânica e ao mesmo tempo baixando o consumo de cimento;
- c) Foi possível se obter resistências extremamente elevadas com o microconcreto, superando-se a casa dos 110 MPa, na medida em que se empregou aditivos superplastificantes como redutores de água e materiais cimentícios suplementares como a sílica ativa; e
- d) Além da resistência mecânica elevada, verificou-se através da análise petrográfica que as novas matrizes cimentícias obtidas possuem uma microestrutura capaz de garantir uma maior durabilidade, na medida em que há uma forte correlação entre a baixa relação água/aglomerante característica destes traços e a diminuição da permeabilidade aos íons cloreto, o que oferece uma perspectiva de aumento da vida útil para os elementos delgados executados com o microconcreto.

Conforme já exposto no capítulo 2 deste trabalho, talvez a maior ambição deste pesquisador seja que em cerca de dez anos, quando o microconcreto de alto desempenho não for mais algo extraordinário, a expressão “argamassa normal de cimento portland” não mais seja apropriada para designar a matriz cimentícia até hoje empregada na argamassa armada.

Da mesma forma como se prevê que um grande salto tecnológico possa ser dado através da aplicação intensiva do concreto de alto desempenho no segmento da pré-fabricação em geral, na medida em o material pode agregar valor e aumentar a densidade tecnológica dos produtos oferecidos, na opinião deste pesquisador, o microconcreto de alto desempenho pode significar a retomada de uma perspectiva promissora para as estruturas delgadas de concreto armado, apontando novos campos para sua possível aplicação na pré-fabricação leve, a partir da comprovação de suas propriedades de elevado desempenho.

Além disso, acredita-se ser possível ultrapassar o campo temático específico das tecnologias para estruturas delgadas, interagindo também com quadros semelhantes existentes em outras tecnologias da família dos concretos,

tanto com relação à qualidade da matriz cimentícia aqui estudada, como por aspectos relativos aos processos de produção e à qualidade final do produto.

Por fim, diminuir espessuras dos componentes pré-fabricados, tornando-os leves e esbeltos, significa também uma oportunidade de adentrar no campo das estruturas laminares e romper com o passado da pré-fabricação histórica nos moldes do pós-guerra europeu, seja na engenharia de estruturas seja na arquitetura.

PERSPECTIVAS FUTURAS PARA O MICROCONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Os anais do 6th International Symposium on Ferrocement, ocorrido no início de junho de 1998, na University of Michigan (LAMBOT SYMPOSIUM, 1998), ademais de um registro técnico valioso sobre as recentes conquistas científicas ocorridas no campo das estruturas de elementos delgados de concreto ou ferrocimento, segundo a designação internacional específica, apresenta claras indicações quanto aos objetivos das futuras pesquisas realizadas neste campo do conhecimento.

Entre os tópicos do temário proposto para o simpósio, chamaram a atenção deste pesquisador, pelo menos quatro deles: pré-fabricados, uso de fibras plásticas, uso de fibras naturais e durabilidade. Os tópicos de pré-fabricados e durabilidade, por sua identificação direta com o campo objeto no qual se insere o presente trabalho, mas também os temas relativos às fibras plásticas e às fibras naturais, que apontam para uma tendência em converter o conhecido ferrocimento em um material composto, reforçado com fibras.

Esta tendência pôde ser ratificada mais recentemente, no sétimo e último “International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites”, realizado em Singapura no ano 2000, o qual traz em seu próprio nome uma clara indicação, ao mencionar a expressão “elementos delgados de materiais compostos reforçados”. Este é hoje um tema subjacente e inevitável quando se estuda o desenvolvimento das estruturas laminares.

Em artigos como aquele escrito por Shah e Peled, fala-se sobre o futuro e a pesquisa avançada em tecnologia do ferrocimento, baseada em materiais

compostos constituídos por matrizes com baixa porosidade, reforçados com fibras, que podem apresentar um alto desempenho e durabilidade (SHAH e PELED, 1998).

A exemplo deste, alguns outros artigos publicados trazem consigo indicações básicas para obtenção de matrizes cimentícias de alto desempenho, com o emprego da sílica ativa e aditivos superplastificantes de alto poder de dispersão, voltadas especificamente para os materiais compostos reforçados com diversos tipos de fibras.

As referências, no entanto, freqüentemente não chegam a apresentar parâmetros para aplicação prática dos conhecimentos obtidos em laboratório. Na presente pesquisa, ao contrário, o ponto de partida foram parâmetros originados nas linhas de produção de pré-fabricados leves de uma usina real, tais como a consistência e a trabalhabilidade requeridas para a matriz de alto desempenho a que se queria chegar.

Por sua vez, este pesquisador sabe perfeitamente bem o quanto se encontra avançada a pesquisa e a aplicação de materiais compostos à base de cimento, a exemplo do GRC (Glass Fiber Reinforced Concrete) ou concreto reforçado com fibras de vidro.

Apesar das pesquisas pioneiras datarem dos anos 1950, na Rússia, foi somente em 1967 que Majumdar e Urev desenvolveram os primeiros estudos do GRC reforçado com a fibra de vidro combinada com zircônio, com vistas a torná-la resistente aos álcalis presentes no cimento portland. A patente da fibra de vidro resistente aos álcalis requerida por Majumdar em 1971, atraiu de imediato o interesse da empresa inglesa Pilkington Brothers, através de sua subsidiária Fibreglass Limited, para produzir as fibras de vidro “AR” (BARTH, 1997).

Por sua vez, em 1980, a empresa holandesa Forton, subsidiária do grupo DSM, lançou no mercado um polímero acrílico que ao ser adicionado à matriz cimentícia permitia a utilização da fibra de vidro comum, tipo “E”, sem riscos de deterioração por ataque alcalino. Barth, citando Santiago, esclarece que o produto resultante é denominado PGRC (Polimer Glass Reinforced Cement). A empresa Forton, ademais, passou a recomendar o emprego de seu polímero acrílico mesmo para o GRC com fibras tipo “AR”, fabricadas pela Pilkington Brothers,

trazendo como conseqüência imediata a diminuição do seu consumo de 30% para 5%. Atualmente o polímero costuma ser utilizado como um aditivo para determinadas aplicações, onde o aumento da durabilidade e a diminuição do tempo de cura do GRC são desejados (BARTH, 1997).

Claro está que o GRC é um material de alta tecnologia, constituído por uma matriz cimentícia de alto desempenho, com aditivos de última geração, reforçada por fibras de vidro resistentes aos álcalis e, igualmente, de elevado desempenho.

Da mesma forma deve se esclarecer aqui que a tecnologia do GRC exige para a sua materialização investimentos importantes em sofisticados equipamentos de mistura e aplicação, que nada têm em comum com os equipamentos convencionais disponíveis no mercado.

Em suma, pode-se dizer que o GRC, embora seja um material fascinante e cuja matriz cimentícia muito tem em comum com o microconcreto de alto desempenho aqui preconizado, está longe de ser uma tecnologia passível de “popularização” como a argamassa armada o foi em passado recente.

Com certeza o modelo que orienta este trabalho guarda uma relação muito mais estreita com a argamassa armada do que com o GRC, no que se refere à relação entre o desenvolvimento da inovação tecnológica e o bem-estar social, na medida em que a pesquisa científica tem como finalidade o benefício da sociedade, no seu sentido mais amplo e essencial.

Portanto, o grande desafio que se impõe para arquitetos e urbanistas, conforme já colocado no início deste trabalho, corresponde a um modelo tecnológico inovador para a habitação social e para as obras de intervenção urbana, mais próximos das necessidades das populações de baixa renda.

O desenvolvimento neste trabalho do microconcreto de alto desempenho insere-se em um modelo tecnológico aqui chamado de “low-tech”, definido em contraposição ao termo “high-tech” inventado por P. Buchanan em 1983, e justifica-se principalmente como uma resposta às necessidades sociais de se viabilizar sistemas e componentes construtivos mais leves, buscando conferir um maior valor agregado ou densidade tecnológica a produtos associados às estruturas de elementos delgados.

Reafirma-se aqui a convicção de que a experiência acumulada no Brasil indica que é viável a implantação de fábricas de componentes pré-fabricados leves de microconcreto de alto desempenho, seja por iniciativa do poder público seja por parte de empreendedores privados, a baixos custos de investimentos em capital fixo e com produtos de qualidade.

Atuar como consequência do pensar, é a maior expectativa que pode depositar neste trabalho este pesquisador e arquiteto-ator, que no limite de suas possibilidades, espera contribuir para o desenvolvimento de conhecimento apropriado e apropriável que venha a se converter em respostas concretas para a superação das carências sociais por espaço edificado que seguem existindo no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) AÏTCIN, Pierre-Claude. **High-performance concrete**. London, New York, E. & F. N. Spon, 1998
- 2) ALAEJOS, Pilar et al. **Hormigones de alta resistencia**: fabricación y puesta en obra. Madrid, GEHO-Grupo Español del Hormigón, 1997 (boletín nº 20)
- 3) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for petrographic examination of hardened concrete**. Based plate: C 856-95. In: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. Philadelphia: 1996, v. 04.02.
- 4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Rochas para revestimento**: análise petrográfica. Rio de Janeiro: ABNT, 1992, 2p. (NBR 12.768/92).
- 5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto e execução de argamassa armada**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990 (NBR-11173/90).
- 6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone**: Método de ensaio - Concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. (MB-2519/86)
- 7) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Verificação de desempenho de aditivos para concreto**: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. (NBR-12317/92 - EB-01401)
- 8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983 (NBR 7211/83)
- 9) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1994 (NBR-5738/94).
- 10) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1974. MB-3 (NBR-5739/74)

- 11) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Controle tecnológico de materiais componentes do concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992 (NBR 12654/92).
- 12) AUSTRIACO, Lilia Robles. **Introduction to ferrocement; history, applications and constituent materials**. In: INTERNATIONAL FERROCEMENT INFORMATION CENTER (IFIC). Short course on design and construction of ferrocement structures; lecture notes. Bangkok, 1985
- 13) BARBERIO V.; MATTONE R. **Problems and prospects of ferrocement in Italy**. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrocement: Lambot Symposium. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, June 7-10, 1998. p. 577-584.
- 14) BARTH, Fernando. **Las fachadas de hormigón arquitectónico y GRC en Cataluña**. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, 1997. Tese (Doutorado). Departament de Construccions Arquitectòniques, Universitat Politècnica de Catalunya, 1997.
- 15) BENEVOLO, Leonardo. Tradução José E. Rodil. **O último capítulo da arquitetura moderna**. São Paulo: Martins Fontes, 1985
- 16) BENTES, Ruy Franco. **Considerações sobre projeto e produção de componentes pré-moldados de argamassa armada**. São Carlos: EESC-USP, 1992. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1992
- 17) BENTES, Ruy Franco; VASCONCELLOS, Luiz A. Engler. O reforço das fibras. **Téchne**, São Paulo, nº 3, p. 28-30, março/abril. 1993.
- 18) BEZERRA, Robério R. **Argamassa armada: aplicação em urbanização de favelas e saneamento básico**. São Paulo: ABCP, 1984. (ET-64)
- 19) CAMPOS, Paulo Eduardo Fonseca de. **Industrialização da construção e argamassa armada: perspectivas de desenvolvimento**. São Paulo: EPUSP, 1989. 201 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1989

- 20) (___). **Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: um estudo de elementos pré-fabricados delgados.** In: NUTAU 2000, agosto/2000. São Paulo: Núcleo de Pesquisas em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - Universidade de São Paulo, 2000
- 21) (___). Tecnologia: para que e para quem?. **Revista Técnica.** São Paulo: PINI, 1999 - nov/dez - nº 43
- 22) (___). **Tecnologias para vencer os desafios da escassez.** In: II Seminario Internacional MejorHab sobre Mejoramiento y Reordenamiento de Asentamientos Urbanos Precarios, Valparaiso, out/1998. Valparaiso, Universidad de Valparaiso, 1998
- 23) (___). **Melhorias urbanas, alternativas tecnológicas e cidadania.** In: I Seminario Internacional MejorHab, Consórcio CATUCHE, Caracas, 1997. CYTED/Proyecto XIV.4, 1997.
- 24) (___). **Argamassa armada; produção industrializada com telas soldadas.** São Paulo: Instituto Brasileiro de Telas Soldadas-IBTS, 1995
- 25) (___). — João Filgueiras Lima ousou projetar a grande arquitetura para os pobres. Montevideo: conferência proferida em 1992 no XIX CONGRESO PANAMERICANO DE ARQUITECTOS. Montevideo: Federación Panamericana de Arquitectos, 1992.
- 26) CAMPOS, Paulo E. F. de e GOY, Leonardo. **Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho.** In: Revista Técnica, set/out - nº 36, São Paulo, PINI, 1998. Tradução do artigo original em inglês de MALHOTRA, V. Mohan. Innovative applications of superplasticizers for producing high-performance concrete. In: 40º Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, ago/1998. São Paulo, IBRACON, 1998
- 27) CAMPOS, Paulo Eduardo F. de; VASCONCELLOS, Luiz A. Engler; LAIZA, Cristina Tokie. **Design and development of ferrocement products.** In: IV Simposio Internacional de Ferrocemento, Cuba, 1991.
- 28) CAMPOS, Paulo E.F. de et al. **Prefabricated Construction Systems designed by Architect João Filgueiras Lima.** In : III Internacional

- Symposium on Ferrocement, Nova Delhi, 1988. Bangkok, Intenacional Ferrocement Information Center. IFIC, 1988.
- 29) CASTRO, Maria Helena de Magalhães (coord.). **A Educação básica na imprensa (1992-96)**: muitos passos, mas, para onde mesmo? Rio de Janeiro: Programa de Promoção da Reforma Educacional na América Latina (PREAL) e BID-Banco Interamericano de Desenvolvimento, 1996
- 30) COSTA, Lucio. São Paulo, out/dez, 1985. In: João Figueiras Lima, Lelé. São Paulo: Instituto Lina Bo e P. M. Bardi; Lisboa: Editorial Blau, 1999. p. 13. (Arquitetos Brasileiros)
- 31) CHAMELETE, Antônio G. **Armaduras para argamassa armada**. São Paulo, ABCP, 1987
- 32) CICYT-COMISIÓN INTERMINISTERIAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. El plan nacional de investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica (2000-2003). Madrid: CICYT, 2000
- 33) COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). **Assesment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (re-design)**. 23e. pléniere du CEB. CEB, Bulletin 162, Lausanne, 1984.
- 34) COPPOLLA, Francis Ford (diretor). **One from the heart**. Los Angeles: filme produzido pela Zoetrope Sudios, 1982.
- 35) CURSO CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA; PRÉ-FABRICAÇÃO, 1988, São Paulo. IPT, Notas de aulas do curso ministrado pelo Dr. Engº Julián Salas, promovido em São Paulo pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e Instituto Eduardo Torroja de Madrid, 1998
- 36) DI PAULA, Jorge. Del arquitecto-autor al arquitecto-actor. **Vivienda popular**. Montevideo, Facultad de Arquitectura, Universidad de la República, nº 6, p. 56-61, febrero. 2000
- 37) ELLIOTT, Kim S. **The design of precast concrete framed structures**. São Carlos: EESC-USP, Course on design of precast concrete structures, Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo e University of Nottingham, 1997

- 38) FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, José Antonio. **Prefabricacion; teoria y práctica**. Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1973.
- 39) FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, José Antonio; NAVARRO VERA, José Ramón. **Eduardo Torroja Miret, ingeniero, engineer**. Madrid: Ediciones Pronaos, 1999
- 40) FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Estudo sobre o déficit habitacional brasileiro com base no censo de 1991 do IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Belo Horizonte, Fundação João Pinheiro, 1995.
- 41) HANAI, João Bento de. **Construções de argamassa armada: situação, perspectivas e pesquisas**. São Carlos: EESC-USP, 1981. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1981
- 42) (___). **Argamassa armada: fundamentos tecnológicos para projeto e execução**. São Carlos: EESC-USP, 1987. Tese (Livre Docência). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987
- 43) (___). **Construções de argamassa armada: fundamentos tecnológicos para projeto e execução**. São Paulo: PINI, 1992
- 44) (___). **Guia na elaboração de projetos de pesquisa na área de tecnologia**. São Carlos: EESC-USP – Departamento de Estruturas, 1996. Material de apoio.
- 45) HANAI, João Bento de; DEBS Mounir Khalil El. Thirty years of reinforced mortar experiences in Brazil. In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Ferrocement, Havana, Cuba, Oct. 22-25, 1991
- 46) HANAI, João Bento de; DEBS Mounir Khalil El. **The future of ferrocement in the Civil Engineering Construction: some questions, answers and trends**. In: 5th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FERROCEMENT, 1994, Manchester. **Proceedings of 5th International Symposium on Ferrocement**. Manchester: IFIC, 1994.

- 47) HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: EPUSP, 1993. Tese (Livre Docência) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993
- 48) 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FERROCEMENT - LAMBOT SYMPOSIUM, 1998, Michigan. **Proceedings of 6th International Symposium on Ferrocement**. Michigan: University of Michigan, 1998.
- 49) 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FERROCEMENT AND THIN REINFORCED CEMENT COMPOSITES., 2000, Singapore. **Proceedings of 7th International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites**. Singapore: IFIC, 2000.
- 50) LATORRACA, Giancarlo (org.). **João Filgueiras Lima, Lelé**. São Paulo: Instituto Lina Bo e P. M. Bardi; Lisboa: Editorial Blau, 1999. (Arquitetos Brasileiros)
- 51) LIBÓRIO, Jefferson B. L. **Relatório técnico de inspeção na cobertura do Terminal Rodoviário “Rita Maria” (Florianópolis-SC)**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, setembro, 1986. Documento interno.
- 52) LIMA, João Filgueiras. Depoimento. **AU-Arquitetura e Urbanismo**, São Paulo, 3 (11): p. 24, abril/maio, 1987.
- 53) LIMA, João Filgueiras. **AU-Arquitetura e Urbanismo**, fevereiro/março, nº 82, entrevista concedida ao jornalista Marcos de Sousa.
- 54) MAHFUZ, Edson. A arquitetura consumida na fogueira das vaidades. **Arquitextos**. São Paulo: (sítio da internet www.vitruvius.com.br), 2001
- 55) MALHOTRA, V.M. (Tradução de Paulo E. F. de Campos e Leonardo Goy). Aplicações inovadoras de superplastificantes para a produção de concreto de alto desempenho. **Téchne**. São Paulo, PINI, nº 36, set., 1998
- 56) MALHOTRA, V. Mohan. **Innovative applications of superplasticizers for producing high-performance concrete**. In: 40^o Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, ago/1998. São Paulo, IBRACON, 1998

- 57) MEHTA, Povindar Kumar. A defesa da “low-tech”. Entrevista concedida a Silvério Rocha. **TÉCHNE**. São Paulo, nº 23, jul/ago, Editora PINI, 1996.
- 58) MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, PINI, 1993
- 59) MORETTI, Ricardo de S. Qualidade fora da lei. **TÉCHNE**. São Paulo: nº 3, mar/abr, Editora PINI, 1993.
- 60) NAAMAN, Antoine E. (coordenador). **Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrocement: Lambot Symposium**. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, June 7-10, 1998
- 61) NEDWELL, P. J.; NAKASSA, A. S. **High performance ferrocement using stainless steel mesh and high strenght mortar**. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrocement: Lambot Symposium. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, June 7-10, 1998. p. 277-284.
- 62) NEVILLE, Adam M. Tradução de Salvador Giammusso. **Propriedades do concreto**. São Paulo, PINI, 1997.
- 63) NIEMEYER, Oscar. São Paulo, set., 1999. In: João Filgueiras Lima, Lelé. São Paulo: Instituto Lina Bo e P. M. Bardi; Lisboa: Editorial Blau, 1999. p. 11. (Arquitetos Brasileiros)
- 64) OLIVEIRA, Mírian C. B.; NASCIMENTO, C. B. do; CINCOTTO, Maria Alba. **Microestrutura de argamassas endurecidas**: uma contribuição da petrografia. In: Anais do CONGRESSO ÍBERO-AMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. Montevideo: Congreso de Patología, Universidad de La República, 1999
- 65) PARAMASIVAM, P. **Recent research and applications of ferrocement in Singapore**. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrocement: Lambot Symposium. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, June 7-10, 1998. p. 53-74.
- 66) ROLNIK, R. e PAZ, R. **El rol asignado a la Gestión Popular en las Políticas de Vivienda en Brasil 1976/1994**. In: Hacia Habitat II; el rol asignado a la participación popular en las políticas de vivienda en América

- Latina - estudos de casos (vários autores). El Salvador, Programa CYTED/FUNDASAL, 1995.
- 67) ROSSI, Paolo. Tradução Frederico Carotti. **Os filósofos e as máquinas, 1400-1700**. São Paulo, Companhia das Letras, 1989.
- 68) SALAS S., Julián. **Alojamiento y tecnología: ¿Industrialización abierta?** Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1980
- 69) (____.). **Contra el hambre de vivienda: soluciones tecnológicas latinoamericanas**. Bogotá: ESCALA, 1992
- 70) (____.). Arquitectura sin aplausos. **El País**. Artigo publicado pelo periódico espanhol (enviado pelo autor), Madrid, 2001
- 71) SERRA, Geraldo G. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: NUTAU-USP, 1997 (CD-ROM/v-1.0)
- 72) (____.). **Concreto de alto desempenho e a nova arquitetura**. In: Concreto de alto desempenho, NUTAU-USP, São Paulo, 1997 (CD-ROM/v-1.0)
- 73) SERRA, Geraldo G.; CAMPOS, Paulo Eduardo F. de. **Prefabricados, hormigón y arquitectura: los objetivos de la investigación en la tecnología de la Arquitectura**. In: Directorios de integración de mercados, CEDINCO, Buenos Aires, 1999
- 74) SHAH S. P.; PELED A. **Advanced in science and technology of ferrocement**. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Ferrocement: Lambot Symposium. University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, June 7-10, 1998. p. 35-51
- 75) SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. - **Relatório Anual de 1999**. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, SNIC, Rio de Janeiro, 2000
- 76) TANGO, Carlos Eduardo de S. **Dosagem de concreto pelo método IPT - notas e planilhas eletrônicas de aula**. Alternativas e inovações tecnológicas do concreto nas construções (Coord. Cláudio Sbrighi Neto). Curso de Mestrado Profissional em Habitação, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. São Paulo, 2000

- 77) TANGO, Carlos Eduardo de S. **Steel corrosion in reinforced concrete poles in Brazilian wet littoral environment - an 'insitu' experimental approach.** Third International Conference on Concrete under Severe Conditions, RILEM, Vancouver, Canada (Proceedings, Accepted Paper), 18-20, June, 2001
- 78) TELLES, Sophia. — Mas afinal, arquitetura é conhecimento?. Campinas, FAU-PUCC – disciplina de História da Arte - notas de aula da graduação, 1979
- 79) TURNER, John F. C. **Freedom to build.** Nova Iorque, 1972.
- 80) VIANNA, Nelson Solano. Afinal, o que é tecnologia da arquitetura?. **Arquitetura e Urbanismo**, São Paulo, 3(11): 40-44, abril/maio, 1987.
- 81) YAMAGUTI, Alexander S.; KENCHIAN, Alexandre e CAMPOS; Paulo E. F. de. **Pré-fabricação por Ajuda-Mútua.** In: III Simpósio Ibero-Americano sobre técnicas Construtivas Industrializadas para Habitação de Interesse Social e I Fórum Brasileiro da Construção Industrializada – Habitação, São Paulo, out/93. São Paulo, CYTED/Projeto XIV.2 – IPT, 1993
- 82) YANES, Carmen. **Tecnologías no convencionales aplicadas a la infraestructura física de los asentamientos urbanos en zonas precarias.** In: Curso Internacional “Habitação; alternativas locais para a crise”. São Vicente, CYTED-Proyecto XIV.4/CEPEL-UNESP, 1997.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- 1) AMARAL FILHO, Cláudio Kerr do. **Microssílica: aplicações no Brasil**. Anais da Reunião Anual de 1987 do Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, julho de 1987, 33 pp.
- 2) (___). **Microssílica em concretos e argamassas de alta resistência**. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Anais... São Paulo: IBRACON, 1988. p. 67-80
- 3) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363 R. **State-of-the-art report on high-strength concrete**. ACI Manual of Concrete Practice, part 1. 48p. Detroit, 1991
- 4) AITCIN, P.C. ; LAPLANTE, P. **The development of high performance concrete in North America**. In: HIGH PERFORMANCE CONCRETE: FROM MATERIAL TO STRUCTURE, London, 1992.
- 5) ALMEIDA, Ivan Ramalho de. **Programa de economia de cimento e qualificação técnico-econômica de aditivos para o concreto**. Niterói, 1984. 128p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, 1984
- 6) AMARAL FILHO, E.M. **Concretos de Alta Resistência, o Futuro das Estruturas**. Simpatcon - 11º Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto. s.l., s.d., 52 pp.
- 7) CARDONA, Omar D. **Estudio comparativo y analisis de competitividad entre estructuras de concreto y estructuras metálicas**. Relatório preparado sob encomenda da ASOCRETO e ICPC da Colombia, Santafé de Bogotá, Ingeniar Consultores, 1996
- 8) INSTITUTO DO CONCRETO PREFABRICADO (ICP). Especificações técnicas para produção de elementos prefabricados de concreto . ICP-1001. São Paulo, 1995

- 9) MAWY, E. G. Hawy. **Fundamentals of High Strength High Performance Concrete** (Concrete Design and Construction Series). Longman Group, United Kingdom, 1996, ISBN: 0582226996
- 10) RICHARDSON, J. G. **Precast concrete production**. Cement and Concrete Association, London, 1973
- 11) (____). **Quality in precast concrete**. New York, Longman Technical and Scientific, 1991
- 12) RODRIGUES, Publio P.F. **Controle de qualidade na indústria de pré-fabricados**. São Paulo: EPUSP, 1989. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1989
- 13) BUCHER, H.R.E. **Desempenho de aditivos redutores de água de alta eficiência em pastas, argamassas ou concretos**. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30. , 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1988. v.2, p.609-625
- 14) COLLEPARDI, M. **Superplasticizers and air entraining agents: state of the art and future needs**. In: V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1993, Berkeley, California. Papers... Detroit: American Concrete Institute, 1994. p.399-416. (ACI Special Publication, 144)
- 15) (____). **Water reducers/retarders**. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology. Park Ridge, Noyes, 1984. Cap.3 p.116-210
- 16) CORRÊA, A.H.M. **Revestimento de Túneis com Segmentos de Concreto Pré-Fabricados**. Revista Ibracon (SP), ano II, nº 6, out/nov/dez 1992, p. 21-28
- 17) DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com adição de microssílica**. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado em engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

- 18) FERRAZ, J.C.F. **O concreto de alta resistência e a estrutura do museu de arte de São Paulo Assis Chateaubriand.** In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 30., 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1988. v.1, p.40-46
- 19) GONÇALVES, J.R.A.; ALMEIDA, I.R.; SHEHATA, L.C.D. **Influência do tipo de agregado graúdo nas propriedades do concreto de alta resistência.** In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 36., 1994, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1994. v.1, p.339-352
- 20) GONÇALVES, J.R.A.; MELO, E.B.; BASÍLIO, F.A. **A influência dos superplastificantes na porosidade capilar e na resistência das pastas de cimento Portland.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 2., São Paulo, 1990. **Anais...** São Paulo, ABCP, 1990. v.1, p.117-132
- 21) HERMANN, E.; CAMERATO, C.R. **Estudos e Aplicação de Concreto de Alta Resistência com Microssilica no Brasil.** 30ª Reunião Anual do Ibracon, Rio de Janeiro (RJ), agosto de 1988, Anais, vol. 1, p. 81-93
- 22) MALHOTRA, V.M. **Superplasticizers: a global review with emphasis on durability and innovative concretes.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE USE OF SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES IN CONCRETE, 3., 1989, Ottawa, Canada. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1989. p.1-17. (ACI Special Publication, 119)
- 23) MEHTA, P.K.; AITCIN, P.C. **Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF HIGH STRENGTH CONCRETE, 2., 1990, Berkeley. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1990a. p.265-286
- 24) MEHTA, P.K.; AITCIN, P.C. **Principles underlying production of high-performance concrete.** Cement, Concrete and Aggregates, Philadelphia, v.12, n.2, p.70-78, Winter, 1990b
- 25) MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: structure, properties and materials.** Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1993