UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FERNANDO MAZZEO GRANDE

**Desenvolvimento de painel alveolar de concreto armado
pré-moldado para habitações de interesse social**

São Carlos

2009

FERNANDO MAZZEO GRANDE

**Desenvolvimento de painel alveolar de concreto armado
pré-moldado para habitações de interesse social**

Tese apresentada ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Área de Concentração:

Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira

São Carlos

2009

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

G751d Grande, Fernando Mazzeo
Desenvolvimento de painel alveolar de concreto armado
pré-moldado para habitações de interesse social /
Fernando Mazzeo Grande ; orientador Osny Pellegrino
Ferreira. -- São Carlos, 2009.

Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2009.

1. Concreto armado. 2. Painel alveolar. 3. Habitação
de interesse social. 4. Resistência à compressão.
5. Construção sustentável. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Arquiteto e Urbanista FERNANDO MAZZEO GRANDE.

Tese defendida e julgada em 02/12/2009 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira (**Orientador**)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. Almir Sales
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Prof. Dr. Obede Borges Faria
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/Campus de Bauru)

APROVADO

Prof. Associado João Adriano Rossignolo
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Titular Eduvaldo Paulo Sichieri
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Profª. Associada **AKEMI INO**
Vice - Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, em exercício

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

*Dedico este trabalho à minha esposa Érica e aos meus filhos:
Gabriela e Pedro César.*

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira, pelos ensinamentos, incentivos, exemplos, pela oportunidade, confiança e orientação.

Aos professores João Adriano Rossignolo e Javier Mazariegos Pablos que me deram todo o suporte para a realização dos ensaios durante suas respectivas gestões na coordenação do LCC.

Ao Prof. Ricardo Martucci por todas as oportunidades e responsabilidades que me foram confiadas e pelos ensinamentos (sempre entusiasmados) sobre arquitetura, tecnologia, urbanismo, vida, trabalho e política.

A todos os meus professores, por tudo que me ensinaram, desde a pré-escola até o doutorado, minha eterna gratidão.

Aos técnicos do LCC: Paulo César (Tico), Paulo Pratavieira e Sérgio Trevelin.

Aos servidores Luis Vareda e Amauri do Laboratório de Engenharia de Estruturas.

A todos os preciosos amigos que tenho. Em especial: George Oda, Antonio Peruzzi, Carlos Gomes, Fábio Fonseca e Samir Fagury.

Aos companheiros da Prefeitura de São Carlos, Eliana Marta Escovar e Alberto Engelbrecht.

A toda minha família que sempre vibrou com os meus feitos. É realmente uma Grande família.

Aos meus avós (in memoriam) Pedro, Alzira, Avelino e Angelina que muito contribuíram para a minha formação.

À minha irmã Márcia, por todo o incentivo e pelo exemplo que sempre foi para mim.

À minha esposa Érica, minha companheira, que esteve comigo nos momentos difíceis, que sempre me motivou a vencer meus desafios e colaborou ao máximo pra que eu tivesse condições de me dedicar ao doutorado.

Finalmente aos meus pais, Maria e Fábio, pois todas as conquistas e valores da minha vida são frutos dos ensinamentos que me deram. Amo vocês.

Muito obrigado a todos.

RESUMO

GRANDE, F. M. (2009). **Desenvolvimento de painel alveolar de concreto armado pré-moldado para habitações de interesse social**. 2009. 157p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos

Este trabalho analisa, por meio de método experimental, a viabilidade de apropriar a produção de painel alveolar de concreto armado para aplicação em habitações de interesse social. Compara os processos industriais praticados para a produção deste elemento com alternativas inovadoras proporcionadas pela incorporação de fôrma interna, ou núcleo alveolar, que permite apropriar a tecnologia para aplicação em diferentes escalas conforme as características de cada empreendimento. Avalia a execução, a conectividade e o desempenho mecânico em relação à resistência à compressão do painel alveolar. Contribui com contexto de construção sustentável e o aproveitamento de resíduos industriais e conclui que o núcleo alveolar incorporado configura inovação tecnicamente viável no processo de produção do painel alveolar que pode ser utilizado em sistemas de fechamento e superestruturas (paredes portantes e lajes) em habitações.

Palavras-chave: painel alveolar; concreto armado pré-moldado; habitação de interesse social; resistência à compressão; construção sustentável.

ABSTRACT

GRANDE, F. M. (2009). **Development of precast reinforced concrete hollow core slab for social housing construction**. 2009. 157p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

This work analyzes the viability of appropriate the hollow core slab production for social housing construction, by means of an experimental method procedure. It compares the industrial process with innovated alternatives proportionate by internal hollow nuclear mould incorporate which provides technology appropriation for several production scales according to construction portage. Evaluate the execution, connectivity (with hydraulic and electric systems) and compressive strength of hollow core slabs. The research's contributions is relate with the context of sustainable construction and the use of industrial waste as construction raw materials and it concludes that internal hollow nuclear mould incorporate is technically viable in hollow core slabs production's process and this precast element could be applied in wall's and slabs for housing construction.

Keywords: hollow core slabs; precast reinforced concrete; social housing; compressive strength; sustainable construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Abordagem integrada de Análise de Ciclo de Vida de um edifício. Fonte: Mateus (2004).....	32
Figura 2.2 - Parâmetros ambientais, funcionais e econômicos potencialmente aplicáveis à metodologia de avaliação MARS-SC. Fonte: Mateus (2004).....	32
Figura 2.3 - Exemplo de seção transversal de painel alveolar. Fonte: www.tatu.com.br/ (acesso em 18/08/2009).....	49
Figura 2.4 - Sistema de ventilação e exaustão utilizando painel de laje alveolar. Fonte: Barton et al. (2002).....	54
Figura 2.5 - Esquema de produção de painel alveolar em fôrma fixa, sequência de 1 a 7. Fonte: Migliore (2008).....	57
Figura 2.6 - Esquema de produção de painel alveolar PCAA – sequência 1 e 2.....	58
Figura 2.7 - Esquema de produção de painel alveolar por extrusão.....	59
Figura 2.8 - Pista de concretagem de uma usina de pré-moldados. Fonte: www.r4tecno.com.br/ (acesso em 08/10/2008).	60
Figura 2.9 - Etapas de produção de painéis alveolares - sequência de 1 a 8	61
Figura 2.10 - Estocagem e movimentação de painéis de lajes alveolares - sequência de 1 a 5. Fontes: http://www.tatu.com.br/ ; http://www.r4tecno.com.br/ ; Migliore (2008)	66
Figura 2.11 - Tratamentos de juntas entre painéis alveolares, sequência de 1 a 3	69
Figura 2.12 - Tratamento de junta e ligação entre PCAA	71
Figura 3.1 - Zona Utilizável (1) e Zona Ótima (2), Limites Inferiores e Superiores, areia do Rio Mogi.....	79
Figura 3.2 - Distribuição do diâmetro das partículas, pedrisco de basalto britado.....	80
Figura 3.3 - Modo de flambagem de colunas submetidas à compressão axial.....	83
Figura 3.4 - Flambagem da coluna em torno do eixo com menor momento de inércia.	83
Figura 3.5 - Dimensões da seção transversal do painel desenvolvido.....	84
Figura 3.6 - Comportamento mecânico teórico do painel submetido à compressão axial. Relação entre carga crítica de flambagem e Módulo de Elasticidade	84
Figura 3.7 - Esquema de produção de <i>rebars</i> de fibra de vidro pelo processo de pultrusão. Fonte: Peruzzi (2007).....	87
Figura 3.8 - A) rebar de origem chilena; B) rebar americana contendo roving em hélice e tratamento superficial de camada de areia e resina; C) rebar liso, produzida no Brasil pela empresa Tecnum sediada em São Carlos e que foi utilizada neste trabalho. Fonte: Peruzzi (2007).....	87

Figura 3.9 - Métodos de ensaio de resistência à tração do rebar – preparação das amostras e condição do dispositivo de tração – sequência de 1 a 4	89
Figura 3.10 - Fôrma metálica para moldagem do núcleo, em fibra de vidro.	90
Figura 3.11 - Produção do molde – núcleo interno do painel alveolar. (1) colocação da manta de fibra de vidro sobre o molde metálico; (2) impregnação de resina poliéster; (3) e (4) Retirada da chapa de fibra de vidro (núcleo do painel alveolar) do molde.	93
Figura 3.12 - Processo de montagem do núcleo alveolar por meio da união das chapas de fibra de vidro. Sequência 1 a 5.....	96
Figura 3.13 - Procedimentos da montagem do núcleo armado e da concretagem do painel alveolar pré-moldado – sequência de 1 a 9.....	99
Figura 3.14 - Método do ensaio de compressão axial realizado nos painéis alveolares. Sequência de 1 a 3.	101
Figura 4.1 – Gráfico tensão por deformação Painei 1	107
Figura 4.2 – Gráfico tensão por deformação Painei 2	107
Figura 4.3 – Gráfico tensão por deformação Painei 3	108
Figura 4.4 – Gráfico tensão por deformação Painei 4	108
Figura 4.5 – Gráfico comparativo do comportamento tensão por deformação	109
Figura 4.6 – Detalhes da ruptura do Painei 1 - sequência de 1 a 4.....	110
Figura 4.7 – Detalhes da ruptura do Painei 2 - sequência de 1 a 4.....	111
Figura 4.8 – Detalhes da ruptura do Painei 3 - sequência de 1 a 4.....	112
Figura 4.9 – Detalhes da ruptura do Painei 4 - sequência de 1 a 4.....	113
Figura 4.10 - Detalhe da ruptura do Painei 3 – comportamento da interface entre matriz e barra de fibra de vidro - sequência de 1 a 3.....	114
Figura 4.11 - Detalhe da ruptura do Painei 1 – comportamento da interface entre matriz, núcleo alveolar e barra de fibra de vidro - sequência de 1 a 6.....	115
Figura 4.12 – Dimensões das seções do painel desenvolvido (medidas em centímetros).....	117
Figura 4.13 – Gráfico E por Carga crítica do comportamento real do Painei	117
Figura 4.14 – Gráfico E por Carga crítica comparativo entre o comportamento real do Painei e do modelo teórico	118
Figura 4.15 – Gráfico E por Carga crítica simulando $L=2,40m$	119
Figura 4.16 – Gráfico E por Carga crítica comparativo entre os Painéis ensaiados ($L=2,15m$) e simulação $L=2,40m$	119
Figura 4.17 – Influência do comprimento de flambagem na carga crítica para $E=18GPa$	120
Figura 4.18 – Peso próprio em função de espessura de algumas alvenarias. Fonte: http://www.tatu.com.br	122
Figura 4.19 – Características geométricas das seções transversais e peso próprio de painéis alveolares disponíveis no mercado nacional. Fonte: http://www.tatu.com.br	123

Figura 4.20 – Produção de protótipo de painel alveolar cujo núcleo é composto por telhas onduladas produzidas de material reciclado de embalagens Tetrapack (seqüência de 1 a 4)	125
Figura 4.21 – Produção de painel alveolar contendo instalações elétricas embutidas (seqüência de 1 a 8).	127
Figura 4.22 - Esquemas representativos dos detalhes de associações de painéis	129
Figura 4.23 – Aspecto geral da construção de uma edificação utilizando-se painéis modulares associados	130
Figura 4.24 – Aspecto geral da produção de painéis de paredes em usina: concretagem, desmoldagem, depósito e transporte	131
Figura 4.25 – Ilustração da concretagem de painéis de paredes sobre piso de concreto diretamente no canteiro de obras	132
Figura 4.26 – Ilustração do aspecto geral da construção de uma edificação utilizando-se painéis de paredes	132
Figura 4.27 – Visualização do processo produtivo de paredes alveolares monolíticas moldadas in loco (seqüência de 1 a 3)	134
Figura 4.28 – Obtenção da área de seção efetiva em painel alveolar obtido pelo método de elementos finitos (FEM). Fonte: Xie (2009).	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dimensões, princípios, desafios e ações da sustentabilidade aplicada à construção civil.....	24
Tabela 2.2 - Consumo comparativo de material entre laje moldada in loco e laje alveolar por fase do sistema estrutural – simulação para edifício de 7 pavimentos. Fonte: López-Mesa et al. (2009)	53
Tabela 2.3 - Diferenças de impacto ambiental nas diferentes partes/fases de sistema estrutural – simulação para edifício de 7 pavimentos. Fonte: López-Mesa et al. (2009)	53
Tabela 2.4 - Diferenças de custo nas diferentes partes/fases de sistema estrutural – simulação para edifício de 7 pavimentos. Fonte: López-Mesa et al. (2009)	53
Tabela 2.5 - Especificações de alguns painéis alveolares disponíveis no mercado nacional.....	63
Tabela 2.6 - Valores do coeficiente de transmissão térmica de painéis pré-fabricados de concreto. Fonte: Oliveira (2002)	72
Tabela 3.1 - Caracterização do cimento Portland utilizado.....	77
Tabela 3.2 - Ensaio realizado para caracterização do agregado miúdo.....	78
Tabela 3.3 - Composição Granulométrica Areia.....	78
Tabela 3.4 - Ensaio realizado para caracterização do agregado miúdo.....	79
Tabela 3.5 - Composição Granulométrica Pedrisco	80
Tabela 3.6 - Propriedades desejáveis do microconcreto em função da geometria da seção do painel e condições de ensaio.....	85
Tabela 3.7 - Propriedades de fibras de vidro utilizadas em compósitos de cimento Portland. Fonte: Peruzzi (2007)	86
Tabela 3.8 - Propriedades da manta de fibra de vidro.....	91
Tabela 3.9 - Propriedades do Adesivo CIANO CA3.	97
Tabela 4.1 – Resistência à Compressão do microconcreto – amostras da concretagem do Painel 1	103
Tabela 4.2 – Resistência à Compressão do microconcreto – amostras da concretagem do Painel 4.....	104
Tabela 4.3 – Módulo de Elasticidade do microconcreto – concretagem do Painel 1 e 4.	105
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de compressão simples em painéis alveolares.....	106
Tabela 4.5 – Correlação resistência mecânica de Painel e dos Corpos-de-prova.....	106
Tabela 4.6 – Deslocamentos limites segundo ABNT NBR 15575	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl.	- Relação água/aglomerante (kg/kg)
a/c.	- Relação água/cimento (kg/kg)
ABCI	- Associação Brasileira de Construção Industrializada
ABCP	- Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
C.V.	- Coeficiente de Variação
C ₂ S	- Silicato dicálcico ou belita
C ₃ A	- Aluminato tricálcico
C ₃ S	- Silicato tricálcico ou alita
C ₄ AF	- Ferroaluminato tetracálcico, ou ferrita
D.P.	- Desvio Padrão
FINEP	- Financiadora de Estudos e Projetos
HIS	- Habitação de Interesse Social
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Estado de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	- Encurtamento
#	- Malha de peneira
E	- Módulo de elasticidade
f_{ck}	- Resistência à compressão (MPa) do corpo-de-prova cilíndrico de microconcreto – valores médios
I	- Momento de Inércia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	21
2.2. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	22
2.2.1. Impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil	26
2.2.1.1. Novas matérias-primas e reaproveitamento de resíduos agroindustriais em compósitos cimentícios para materiais e componentes de construção civil como alternativa de minimizar impactos ambientais	27
2.2.1.2. Ferramentas de gestão de projeto (<i>green building tools</i>).....	31
2.2.2. Bases para as ações de política tecnológica de sustentabilidade da construção civil	33
2.3. ESTRATÉGIAS DE IMPLANTAÇÃO DA MUDANÇA DE PARADIGMA	36
2.3.1. Ações relativas aos recursos humanos.....	36
2.3.2. Ações relativas à implantação de infra-estrutura de tecnologia industrial	36
2.3.3. Ações de integração da cadeia produtiva.....	37
2.3.4. Introdução da gestão ambiental e da sustentabilidade nas decisões de projeto, uso e ocupação	38
2.3.5. Inovações relacionadas à gestão e informação	38
2.3.6. Pesquisa e desenvolvimento de tecnologia aplicada de produtos, processos e sistemas construtivos.....	39
2.3.7. Ampliação do acesso ao crédito	40
2.3.8. Regularização e re-qualificação da cidade informal – responsabilidade territorial.....	40
2.3.9. Disseminação da informação e da produção científica aplicada	41
2.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A SUSTENTABILIDADE E A RACIONALIZAÇÃO DE PROCESSOS CONSTRUTIVOS NO BRASIL.....	42
2.4.1. Considerações sobre pré-fabricação de componentes de concreto	45
2.4.2. Características da pré-fabricação.....	46
2.5. A TECNOLOGIA DE PAINÉIS ALVEOLARES DE CONCRETO ARMADO	47
2.5.1. Pesquisas relacionadas a painéis alveolares	50
2.5.2. Processos de produção do painel alveolar	55
2.5.2.1. Produção em fôrmas fixas	55
2.5.2.2. Extrusão.....	59
2.5.3. Diagnóstico das opções de mercado, dos módulos e dos padrões de conexão.....	62

2.5.4. Tendências e inovações na tecnologia de pré-fabricados e sua aplicação ao painel alveolar	72
3. MATERIAIS E MÉTODOS	76
3.1. CIMENTO PORTLAND	76
3.2. AGREGADOS	78
3.2.1. Agregado miúdo.....	78
3.2.2. Agregado graúdo.....	79
3.3. MICROCONCRETO	80
3.4. ARMADURA DE FIBRA DE VIDRO	86
3.5. MÉTODO DE PRODUÇÃO DO PAINEL ALVEOLAR	65
3.6. MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO DO PAINEL ALVEOLAR	100
4. RESULTADOS	103
4.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO MECÂNICO.....	103
4.1.1. Corpos de prova cilíndricos de microconcreto.....	103
4.1.2. Painéis alveolares submetidos à compressão axial.....	105
4.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PAINEL ALVEOLAR	121
4.2.1. Sugestões de processos de produção de painéis alveolares.....	127
4.2.1.1. Produção do módulo do painel alveolar	128
4.2.1.2. Produção de painéis de paredes alveolares.....	130
4.2.1.3. Produção de paredes alveolares monolíticas in loco	133
4.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	134
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
REFERÊNCIAS	143
APÊNDICE A	155

1. INTRODUÇÃO

O tema deste trabalho trata do desenvolvimento de inovações no processo de produção de painel alveolar de concreto armado pré-moldado visando adaptar essa tecnologia para aplicações em habitações de interesse social.

O desenvolvimento deste painel é objeto do edital Chamada Pública MCT/FINEP/FNDCT/CAIXA - HABITARE - 01/2006 sob o tema: Desenvolvimento e Difusão de Tecnologias Construtivas para a Habitação de Interesse Social; sendo que dentre as metas deste projeto consta o desenvolvimento de painéis cimentícios pré-moldados modulares.

O tema é integrante do projeto “Soluções Tecnológicas Modulares para Habitação de Interesse Social”, desenvolvido por pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) em uma parceria entre a Escola Politécnica, a Escola de Engenharia de São Carlos e a Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, com apoio do Programa de Tecnologia de Habitação (Programa Habitare), da FINEP. A meta é ampliar o uso da tecnologia de painéis alveolares para a habitação de interesse social, para aplicação em paredes ou lajes, oferecendo a empreendimentos de interesse social os benefícios da racionalização e pré-fabricação da construção.

A necessidade de tornar “apropriadas e apropriáveis” as tecnologias de materiais e sistemas construtivos se configura em um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

Considerando o déficit habitacional brasileiro e a implantação de políticas públicas para o financiamento e subsídio de programas habitacionais de interesse social, amparadas pelo Plano Nacional de Habitação de Interesse Social – PNHIS torna-se urgente o emprego, ou apropriação, de tecnologias e sistemas construtivos racionalizados, baseados na pré-moldagem e pré-fabricação e que possibilitem a ampla utilização de mão-de-obra para que se cumpram as metas de produção de habitações necessárias para a minimização deste déficit.

É, portanto, evidente a necessidade de produzir edifícios com maior produtividade, diminuição geral do desperdício (material e mão-de-obra) e incorporação de novas matérias-primas. Tais considerações significam, na verdade, reflexos na gestão urbana e ambiental das cidades.

A incorporação de matérias-primas advindas da reciclagem e reaproveitamento de resíduos agroindustriais encontra na construção civil uma condição muito favorável, pois os

materiais e componentes utilizados na produção de habitação são de composição e produção simples, toleram variações razoáveis de padrões dimensionais e possuem resistências mecânicas relativamente baixas. Obviamente tal aplicação deve ser precedida de análises que garantam a salubridade, desempenho e durabilidade dos ambientes construídos, além de possibilitarem uma disposição e tratamento adequados quando estes materiais forem descartados novamente.

Desse modo, no âmbito da construção civil, as ações que se destinam à redução de impactos ambientais devem considerar aspectos de gestão, *design* (de materiais, sistemas construtivos e edifícios), conservação de recursos naturais, desenvolvimento urbano e aspectos socioculturais.

A tecnologia de painéis alveolares é empregada em larga escala para construções de plantas industriais e edifícios comerciais. A aplicação em habitações tem sido muito restrita. Neste segmento, o processo de produção ainda se constitui de características artesanais e tradicionais. No entanto, algumas experiências em mutirões habitacionais com emprego de sistemas construtivos baseados na pré-fabricação têm se mostrado viáveis, tendo em vista a característica da mão-de-obra utilizada para a construção das unidades habitacionais.

Industrialmente, painéis alveolares são moldados a partir de uma forma metálica, ou em longas pistas de concretagem, com comprimentos geralmente superiores a 100 metros. Depois da cura, os componentes são cortados nas dimensões solicitadas pelo cliente. Essa sistemática depende de equipamentos de corte com discos diamantados de alta rotação, o que acarreta geração de resíduos e elevado consumo de energia.

A convergência das questões relacionadas acima motivou a apropriação da tecnologia de painéis alveolares para aplicação em habitações. As inovações propostas influenciam de sobremaneira os processos de produção do elemento e conseqüentemente do ambiente construído.

O processo de produção de painéis e paredes alveolares proposto neste trabalho poderá ser realizado em escalas diferenciadas - industrial e manufatura - apropriadas às características do porte de cada empreendimento para uso em lajes e painéis de parede autoportantes para construção de habitações.

HIPÓTESE:

A tecnologia de painéis alveolares de concreto armado é passível de ser apropriada para aplicação na construção de habitações por meio de inovações que possibilitariam uma produção deste componente em manufatura. Tais inovações são:

- incorporação da fôrma interna que configura os alvéolos de material alternativo e/ou resíduos encapsulados em matrizes poliméricas e;
- utilização de concreto adensável convencional adaptando o processo de concretagem à demanda de cada empreendimento.

OBJETIVOS

Produzir painéis alveolares de concreto armado com uma fôrma interna incorporada que configura os alvéolos e avaliar o desempenho mecânico deste componente em ensaio de compressão e flambagem.

JUSTIFICATIVA:

O desenvolvimento e pesquisa de materiais, componentes, sistemas e processos construtivos inovadores, racionalizados e sustentáveis é uma condição básica para a melhoria da qualidade, desempenho e produtividade dos processos de produção de edifícios.

A implementação definitiva de sistemas construtivos racionalizados é fundamental principalmente quando nos deparamos com a necessidade de construir ou adequar as habitações para uma demanda cada vez maior e que tem dificuldade de se beneficiar dos mecanismos tradicionais de acesso ao crédito imobiliário.

Painéis alveolares são os elementos pré-moldados mais empregados no mundo, em especial na América do Norte e Europa Ocidental. A produção mundial deste componente é de aproximadamente 150 milhões de metros cúbicos por ano, segundo Castilho (2003).

O Paine Alveolar disponível no mercado é produzido com elevado controle tecnológico em fábricas que contém instalações e equipamentos sofisticados.

Apesar de sua viabilidade comprovada em construções de plantas industriais, o estado da técnica de painéis alveolares apresenta alguns fatores limitantes para a sua aplicação em habitações:

- a) Alto custo de produção conseqüente do elevado grau de industrialização;

- b) O processo de produção possui pouca conectividade com subsistemas de instalações prediais elétricas, hidráulicas e sanitárias, ou seja, sua produção não possui lógica de sistema;
- c) Durante o processo construtivo, o tratamento de juntas é dificultado;
- d) Os equipamentos utilizados para transporte e instalação dos painéis são de grande porte (guindastes, guias, guinchos etc);
- e) Na alvenaria, geralmente é utilizado como painel de fechamento associado à estrutura de concreto pré-moldado ou metálica, apesar da elevada resistência mecânica.

Quanto ao processo de produção destes componentes, existem três opções no mercado nacional:

- aqueles produzidos por extrusão de concreto com baixa relação água/cimento em pistas de concretagem.
- os moldados em pistas de concretagem utilizando-se armaduras protendidas, fôrmas fixas e concreto adensável;
- os moldados com concreto adensável sobre armadura de tela de aço eletrosoldada emoldurados por fôrma metálica (de bordo) que contem no sentido longitudinal furos que servem para a passagem de tubos metálicos que conformarão os alvéolos. Os tubos são retirados quando se inicia a “pega” do concreto.

Tais características dos processos de produção deflagram uma dependência direta da planta industrial e de uma complexidade em termos de logística que acarreta em elevado custo de produção.

O método desenvolvido neste trabalho permite que as fôrmas dos painéis sejam racionalizadas e padronizadas para as diversas necessidades, possibilitando a modulação de vãos e eliminando a fase de corte no processo produtivo.

Além disso, a alternativa em estudo é a fabricação dos painéis permitindo que sejam posicionados previamente os dutos e caixas relativas às instalações elétricas. A montagem da peça poderá ser realizada em diversas escalas, apropriadas às características disponíveis em termos de porte do empreendimento, condições do canteiro e mão-de-obra.

Desse modo, a apropriação desta tecnologia tornando-a viável em construções habitacionais de interesse social por meio de programas de autogestão é interessante, pois permitiria explorar todas as vantagens e características inerentes aos sistemas de pré-moldados, acarretando em redução de custos, desperdícios e peso próprio da estrutura, além

de otimizar a logística do canteiro de obras e possibilitar a formação de mão-de-obra com visão sistêmica da produção do edifício.

Isto posto, procura-se inovar a tecnologia de painéis alveolares de concreto armado desenvolvendo o processo de produção de maneira a possibilitar sua adaptação aos sistemas construtivos consolidados.

Conseqüentemente, numa visão macro, se contribui para a aplicação de conceitos da industrialização e desenvolvimento sustentável relacionados à construção civil, cujos benefícios sócio-econômicos da implantação de modelos racionais de produção de edifícios são importantes e fundamentais para garantir qualidade de vida, redução da degradação de paisagens urbanas decorrente da exploração de recursos naturais ou da disposição de resíduos de construção, desenvolvimento urbano, preservação e sustentabilidade ambiental.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A necessidade de cumprir às exigências de extração de matérias-primas, de manejo e de disposição de resíduos sólidos vem sendo imposta, nas duas últimas décadas, por leis e órgãos ambientais em todo o mundo, tornando-se um grande desafio para os sistemas produtivos.

No decorrer da história da civilização, segundo John (2001), a visão de progresso e soberania de um povo vem associada ao domínio e transformação do meio ambiente. Há bem pouco tempo, os modelos dos processos de produção eram acompanhados do paradigma de que a preservação de recursos naturais é antagônica ao desenvolvimento.

Contudo, índices de poluição do ar, do solo e da água alertaram que a velocidade da exploração de recursos naturais cada vez maiores traçavam um futuro perverso para o planeta. Foram criadas agências ambientais que introduziram o conceito de **controle ambiental** da fase de produção industrial e estabeleceram leis que limitavam a liberação de poluentes. A consolidação do conceito de **desenvolvimento sustentável** surgiu da percepção de que o modelo de produção linear é incapaz de se perpetuar. A AGENDA 21 (1998), afirma que o desenvolvimento sustentável não apenas demanda a preservação de recursos naturais, mas também uma maior equidade no acesso aos benefícios do desenvolvimento, conceito que abrange importantes consequências sociais.

Em decorrência disso, a análise de impacto ambiental das atividades humanas passa a incorporar todas as consequências das práticas de produção e de consumo, desde a extração, processamento industrial, transporte e destino final dos resíduos de produção e de consumo.

Desse modo, no âmbito da construção civil, as ações que se destinam à redução desses impactos devem considerar aspectos de gestão, *design* (de materiais, sistemas construtivos e edifícios), conservação de recursos naturais, desenvolvimento urbano e aspectos socioculturais.

Para tanto, deve-se destacar a importância da avaliação das técnicas e dos materiais em uso para um diagnóstico sobre os problemas encontrados na adoção de determinadas soluções (de ordem patológica ou ambiental) e, conseqüentemente, buscar alternativas produzidas prioritariamente com materiais e subprodutos localmente disponíveis.

Percebe-se, portanto, que a implantação definitiva de um modelo de gestão sustentável no setor da construção civil depende de interações entre o setor privado, o consumidor e o poder público, mas não há dúvidas de que os benefícios desse novo paradigma são imprescindíveis para o desenvolvimento saudável das nossas cidades e para a redução do déficit habitacional.

2.2. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Conforme Vázquez & Barra (2000), a construção sustentável baseia-se na prevenção e redução de resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas no uso de materiais locais, recicláveis ou reutilizáveis, no uso de resíduos como materiais secundários e na coleta e adequada deposição inerte.

Bernstein (1996) cita uma pesquisa da *Civil Engineering Research Foundation* (CERF), na qual a questão ambiental foi considerada a segunda tendência mais importante para o futuro, atrás apenas da informática.

Serrador (2008) expõe que o conceito de construção sustentável evoluiu para termos mais abrangentes que os relacionados apenas às questões ambientais. CIB e UNEP-IETEC (2002) definem construção sustentável como a condição ou estado que permitiria a existência do homem provido de segurança, saúde e vida produtiva para todas as gerações em harmonia com a natureza e os valores culturais e espirituais locais, ou seja, trata-se de um processo dinâmico focado nas necessidades e demandas das pessoas pela equidade, prosperidade e qualidade de vida.

Gibberd (2004) declara que a edificação sustentável maximiza os efeitos sociais e econômicos benéficos e minimiza os impactos ambientais negativos.

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Formoso (2002) parte da premissa de que a Indústria da Construção Civil evoluirá no sentido de contribuir para a sustentabilidade econômica, social e ambiental de uma forma integrada, pois não é possível que uma ocorra em detrimento de outras, pois além de representar uma considerável participação no PIB (econômica) e ser responsável também por uma expressiva parcela na geração de postos de trabalho (social), utiliza recursos naturais e sua atividade está diretamente relacionada ao meio-ambiente, na medida em que interfere com a natureza ao realizar intervenções de grande impacto, tais como barragens, rodovias e edificações.

A redução de impacto ambiental da construção é tarefa complexa e, conforme Kilbert (1994) é necessário: 1) minimizar o consumo de recursos; 2) maximizar a reutilização de

recursos; 3) usar recursos renováveis e recicláveis; 4) proteger o meio ambiente; 5) utilizar materiais não tóxicos; 6) priorizar a qualidade das construções.

Conforme cita o *International Council For Research And Innovation In Building And Construction* (1999), as ações destinadas à redução do impacto ambiental da construção civil deverão considerar os seguintes aspectos:

- ✓ Organizacionais e de gestão;
- ✓ *Design* de componentes e de edifícios, incluindo aspectos relativos à possibilidade de reutilização e reciclabilidade;
- ✓ Conservação de recursos naturais;
- ✓ Desenvolvimento urbano;
- ✓ Aspectos sociais, culturais e econômicos.

John et al. (1996) afirma que essas diretrizes gerais devem ser manifestadas em preocupações técnicas específicas, por exemplo, o aumento da durabilidade de uma edificação, expresso em termos de vida útil. Desse modo, a especificação de materiais estará condicionada por decisões de caráter eminentemente técnico, como contaminação do ar interno, durabilidade no ambiente a que serão expostos, deposição e possibilidade de reciclagem.

O conceito de análise do ciclo de vida (LCA da expressão em inglês)¹ sustentou o desenvolvimento das metodologias para avaliação ambiental de edifícios. Esse método considera os impactos na cadeia global sobre todas as fases de produção, partilhando o objetivo de encorajar a demanda do mercado por níveis superiores de desempenho ambiental, provendo análises em diversos níveis de complexidade para diagnosticar intervenções e orientar projetistas.

Yuba (2005) sintetiza as principais dimensões da sustentabilidade: a ambiental, social, econômica, política e cultural e afirma que as mesmas são indissociáveis. A Tabela 2.1, adaptada de Yuba (2005 apud Serrador, 2008), ilustra algumas das dimensões da sustentabilidade na construção civil, bem como os desafios e ações pertinentes a cada uma delas:

¹ *Life Cycle Assessment*

Tabela 2.1 - Dimensões, princípios, desafios e ações da sustentabilidade aplicada à construção civil.

Dimensão	Princípios	Desafios	Ações
Ambiental	Preservação natural, eficiência energética, prevenção da poluição e respeito à capacidade de carga dos ecossistemas	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir a exploração de recursos naturais em todo o ciclo de vida; - Reduzir a liberação de emissões poluentes; - Respeitar e promover o funcionamento de ecossistemas em escala local, regional e global; - Vencer a barreira e a dependência tecnológica dos países em desenvolvimento; - Incentivar as inovações tecnológicas aplicadas aos materiais e métodos de construção; - Melhorar a qualidade do produto (projeto e construção) - Difundir tecnologias ambientalmente amigáveis 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir a geração de resíduos; - Eficiência energética; - Menor consumo de água; - Maior durabilidade; - Menor uso de minérios naturais. - Pesquisar os mecanismos de patologias e indicar os métodos de manutenção e prevenção; - Reduzir a emissão de efluentes; - Promover o correto tratamento e disposição de resíduos gerados (construção e uso); - Prever sistemas de reuso de águas servidas/pluviais e sistemas de captação de energia solar/eólica.
Social	Promoção da equidade de acesso aos benefícios do desenvolvimento, combate à pobreza, respeito à diversidade	<ul style="list-style-type: none"> - Promoção de ambientes de trabalho seguros e saudáveis; - Satisfação das necessidades do usuário; - Promover interação dos trabalhadores com os processos sustentáveis; - Acesso universal e flexibilidade da edificação a possíveis mudanças de uso 	<ul style="list-style-type: none"> - Apoiar programas de capacitação e treinamento; - Desenvolver e difundir materiais e técnicas que causam menor impacto à saúde; - Melhorar a remuneração (igualdade); - Considerar a acessibilidade; - Intervir em áreas de risco ocupadas por assentamentos subnormais
Econômica	Distribuição de renda, geração de emprego, exploração do potencial econômico local	<ul style="list-style-type: none"> - Promover os benefícios da sustentabilidade como fator de aumento de lucro; - Sustentabilidade como fator de competitividade; - Mobilizar recursos para apoiar iniciativas sustentáveis; - Promover amplo acesso ao crédito habitacional 	<ul style="list-style-type: none"> - Elaborar produtos e serviços diferenciados, utilizando da consciência ambiental como fator de competitividade (design); - Avaliar e melhorar continuamente todo o processo de produção (materiais, componentes, edifícios) com metodologia de LCA; - Parcerias público-privadas e com instituições de ensino e pesquisa para difusão de iniciativas sustentáveis; - Aprimorar a composição de custos no desenvolvimento de projetos de edificações e bens construídos; - Crédito imobiliário (aquisição de imóveis prontos, materiais de construção); - Subsídios para financiamentos de habitações que incorporem materiais e técnicas sustentáveis
			“continua”

Dimensão	Princípios	Desafios	Ações	“conclusão”
Política	Governo participativo, articulação de políticas públicas, elaboração de arcabouço legislativo (Plano Diretor, Código de Obras e Edificações etc)	- Apoiar a sociedade civil organizada; - Constituir parcerias e cooperações com empresas e instituições privadas, bem como centros de pesquisa; - Implementar ações de melhoria da gestão pública (responsabilidade fiscal, territorial e ambiental)	- Definição de políticas claras de arranjos produtivos; Unir esforços de cooperação com entidades do próprio setor; - Estabelecer Programas de Qualidade para a contratação de obras e serviços; - Apoiar as formas de associação populares, promovendo ampla assessoria técnica para a formação de cooperativas (trabalho e habitacionais); Gerenciar o cadastro de demanda habitacional; - Adotar iniciativas sustentáveis no âmbito da administração; - Estabelecer parcerias com as instituições de ensino e pesquisa para a ampla disseminação das práticas sustentáveis; - Implantar sistemas de regulamentação e monitoramento da ocupação do território (Leis, SIG); - Exigir Estudo de Impacto/Incômodo de Vizinhaça (EIV) dos empreendimentos a serem implantados.	
Cultural	Promoção da diversidade, integração, preservação e conservação do patrimônio histórico (urbanístico, paisagístico e ambiental)	- Reavaliar e resgatar as técnicas tradicionais; - Recuperar valores éticos; - Superar a resistência à inovação tecnológica	- Resgatar a capacidade de trabalho associativo (mutirão); - Viabilizar técnica e economicamente os materiais e processos alternativos e/ou inovadores, - Adequar materiais e processos construtivos à realidade da comunidade; - Aumentar a percepção do usuário acerca da sustentabilidade em termos práticos (consumo de energia elétrica, água, geração de entulho, flexibilidade etc); Resgatar e adequar técnicas tradicionais incorporando-as em conceitos de racionalização.	

Conforme Peng et al. (1997), as intervenções de projeto e execução de construções devem seguir um modelo hierárquico apresentado: **a redução** como a alternativa mais eficaz para diminuição do impacto ambiental; **a reutilização** definida como a simples movimentação de materiais de uma aplicação para outra – decisão que utiliza o mínimo de processamento e energia; **a reciclagem** dos resíduos, ou seja, a transformação destes em novos produtos.

Mora (2005) explora a possibilidade de criar estruturas duráveis com materiais efêmeros e alternativos (como o adobe), correlacionando a questão com os impactos do

crescimento dos centros urbanos no consumo de matérias-primas e energia. O autor defende que a durabilidade da construção é proporcional à durabilidade dos materiais utilizados conjugada com as decisões de projeto (especialmente as relativas à manutenção e coordenação modular).

A proposta de viabilizar diretrizes que possam indicar parâmetros acerca da sustentabilidade das decisões tecnológicas envolvidas na produção de habitações justifica-se pela característica do setor da construção civil, como se demonstra a seguir.

2.2.1. Impactos ambientais gerados pela indústria da construção civil

A indústria da construção civil contribui de forma significativa para o desenvolvimento sócio-econômico de uma nação. John (2001) afirma que nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil passe por profundas transformações, pois qualquer atividade humana necessita de um ambiente construído e os produtos da construção civil são sempre de grandes proporções. John & Angulo (2004), demonstram que, no Brasil, o setor representa 15,5% do PIB nacional.

Sjöström² (1992 apud John, 2001) estima que a construção civil consuma algo entre 25% e 50% do total de recursos naturais explorados pela sociedade.

Lippiatt (1998), Bourdeau (1999) e Industry and Environment (1996) demonstram que a construção civil responde por cerca de 40% da energia utilizada mundialmente a cada ano. Desse valor, 80% são consumidos no beneficiamento, produção e transporte dos materiais. Além disso, 30% das emissões que provocam aquecimento global têm origem no setor.

Dobbelsteen et al. (2002) verificaram que o consumo de energia em edifícios comerciais durante a sua execução responde por cerca de 77,5% do impacto ambiental causado pela obra. Os autores afirmam que os materiais especificados correspondem a 19,5% deste percentual, sendo que 60% destes são utilizados na superestrutura.

Adetunji et al. (2008) aponta que recentemente o conceito de sustentabilidade ganha espaço na gestão de suprimentos da indústria da construção civil, definindo o conceito de *Sustainable Supply Chain Management (SSCM)* que consiste em identificar os valores econômico, social e ambiental em toda a cadeia de suprimentos e analisar seu potencial de

² SJÖSTRÖM, C. (1992). *Durability and sustainable use of building materials*. In: Sustainable Use of Materials. London. Llewellyn & Davies. BRE / RILEM

risco de impacto, desenvolvendo ferramentas de avaliação que permitam tomar decisões para minimizar os impactos e mitigar os riscos. (DRABÆK e BRINCH-PEDERSEN, 2003).

Entretanto, a aplicação de sustentabilidade em gestão de suprimentos ainda é incipiente e requer uma série de providências de diversos agentes de forma integrada e correlata para permitir a migração de uma gestão focada em aspectos econômicos para outra que agrega nestes os valores sociais e ambientais.

A indústria da construção civil é a principal geradora de resíduos da economia mundial. Os valores típicos de resíduos produzidos nas atividades de construção, manutenção e demolição, segundo Carneiro et al. (2001), encontram-se entre 400 e 500 kg/hab.ano. Pinto (1999) constatou que a maior parte desses resíduos é depositada ilegalmente, acumulam-se e geram custos que agravam problemas urbanos.

Tais dados se tornam ainda mais preocupantes, dentro da realidade brasileira, quando analisadas as considerações de Camargo (1995) as quais apontam que o desperdício dos canteiros de obra chega a valores próximos de 30%. Lima e Silva, (1998). Pinto (2000) e Leite (2001), afirmam que cada metro quadrado construído gera cerca de 150 kg de resíduos.

2.2.1.1. Novas matérias-primas e reaproveitamento de resíduos agroindustriais em compósitos cimentícios para materiais e componentes de construção civil como alternativa de minimizar impactos ambientais

A atual conjuntura contempla a preocupação com o gerenciamento de recursos energéticos e a degradação ambiental. Com isso, tem havido intensa busca por materiais não poluentes que consumam baixa energia em sua produção e utilização.

O setor produtivo e as instituições de pesquisa têm voltado sua atenção para materiais cujas aplicações eram comuns nos períodos pré-industriais, como as fibras vegetais e materiais cimentícios alternativos.

Assim, configura-se um potencial de utilização para os recursos provenientes da biomassa, definido por Demirbas (2001) como aqueles provenientes da madeira e seus rejeitos, resíduos agrícolas, lixo orgânico das cidades, resíduos do processamento de alimentos, plantas aquáticas e algas. Destacam-se, nesse âmbito, os materiais lignocelulósicos (madeira, bagaço de cana, sisal, palha de trigo e de arroz dentre outros), que têm encontrado outras utilizações como a conversão a termoplásticos, reforço ou carga em materiais compósitos com matrizes das mais diversas naturezas, inclusive cimentícias. Cita-se Savastano Junior et al (1999, 2000 e 2003).

A reciclagem de resíduos sólidos urbanos e industriais também configura um amplo campo de pesquisa para aplicação na construção civil. John (2000) conclui que, do ponto de vista prático, a reciclagem apresenta dois tipos de risco. O primeiro está associado à inovação tecnológica e todas as variáveis que compreendem a transferência de tecnologia. O segundo é o risco da própria reciclagem, pois há resíduos perigosos e não inertes os quais o encapsulamento tem um elevado grau de periculosidade à saúde dos trabalhadores e dos usuários das construções.

De modo geral, a reciclagem de resíduos como material de construção envolve a seguinte metodologia de pesquisa e desenvolvimento, conforme John (2000):

- ✓ a caracterização física e química do material;
- ✓ a busca de aplicações possíveis dentro da construção civil;
- ✓ o desenvolvimento de tal aplicação (processo produtivo)
- ✓ análise do desempenho do produto frente às necessidades do usuário;
- ✓ análise do impacto ambiental do novo produto numa abordagem de LCA;
- ✓ viabilidade econômica;
- ✓ transferência de tecnologia.

Portanto, trata-se de um processo que exige a capacidade de integrar conhecimentos multidisciplinares e de igual importância para sua concretização.

Em síntese, as vantagens da reciclagem podem ser resumidas em:

- ✓ preservação de recursos naturais, por exemplo a substituição de agregados naturais por reciclados na confecção de argamassas;
- ✓ a redução do volume de aterros e incinerações;
- ✓ a redução do consumo energético;
- ✓ redução dos níveis de poluição para a produção de um determinado produto;
- ✓ geração de empregos e aumento de competitividade econômica do setor;
- ✓ melhoria da qualidade técnica (durabilidade e resistência mecânica) de alguns materiais de construção, caso comprovado por inúmeras pesquisas que envolvem a adição de pozolanas ou fillers (microssílicas), ou ainda, fibras naturais e sintéticas em materiais a base de cimento Portland.

Em contrapartida, é importante salientar, que todo processo de reciclagem de resíduos deve ser analisado com muito critério, pois muitas vezes, a distância de transporte, o procedimento de limpeza e classificação de um resíduo e a própria tecnologia envolvida no processo de reciclagem podem inviabilizá-lo. Essa consideração é fundamental para o desenvolvimento dessa pesquisa, pois se pretende propor um elemento capaz de incorporar

resíduos em sua constituição e que o mesmo possa ser reciclado ao final da vida útil do ente construído sem que este processo represente significativos investimentos e impacto ambiental para ser realizado.

O concreto é o material de construção mais empregado no mundo em termos de volume, concomitantemente o mais impactante. Produtos a base de concretos e argamassas que possuam bom desempenho mecânico e durabilidade e que incorporem novas matérias-primas disponíveis (subprodutos ou resíduos agroindustriais) são indispensáveis para que se satisfaçam as demandas por infra-estrutura urbana e de habitação, conforme Damtoft et al. (2008).

O encapsulamento de resíduos em matrizes cimentícias tem se mostrado viável técnica e ambientalmente. Vários autores exploraram a potencialidade de incorporação de matérias-primas renováveis ou vindas da reciclagem de resíduos agroindustriais para a fabricação de materiais e componentes para a construção civil.

Pode-se citar a pesquisa de Falcão & Stellin Junior (2001) e Calmon et al (1998) que utilizaram, respectivamente, finos de serraria e resíduos de corte de granito em tijolos e blocos de solo-cimento.

Miller & Azad (2000) e Kaniraj & Havanagi (1999), estudaram a influência de cimento Portland de alto forno e a incorporação de cinzas volantes na estabilização de solos com cimento visando à produção de tijolos.

Abiko (1987) tratou sobre a questão do consumo energético para a fabricação de cimento, provando que resíduos de casca de arroz (cinzas) e resíduo cerâmico têm potencial para transformarem-se em subprodutos para a indústria de cimentos.

Nascimento et al. (2000) exploraram a utilização de cinzas provenientes da incineração de resíduos sólidos domiciliares na composição de blocos de concreto e argamassa armada.

Carneiro et al. (2001) demonstraram o emprego do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição (RCD) da região metropolitana de Salvador para a fabricação de tijolos de solo-cimento, blocos de concreto, artefatos pré-moldados (guias de logradouros) e confecção de bases e sub-bases de pavimentos.

Adesanya (1996) pesquisou o efeito da adição de cinzas da espiga de milho como fator de redução de custos em produtos à base de cimento. Geyer & Razuk (2002), demonstraram a viabilidade da utilização de escória de aciaria elétrica na composição de blocos de concreto.

Kazmierkczak et al. (2001) analisaram a utilização de resíduos da indústria coureiro-calçadista no desenvolvimento de novos materiais de construção (painéis e blocos de gesso e matrizes de cimento Portland).

Schultz (2005) investigou a utilização de resíduos em painéis sanduíche. O núcleo foi elaborado em compósito polimérico, baseado na aglomeração por matriz de resina poliuretana vegetal de resíduos de diferentes setores industriais: serragem de couro curtido ao cromo, serragem de madeira e partículas de borracha provenientes do desmanche de pneus inservíveis.

Diversos autores investigaram a incorporação de agregados reciclados de construção e demolição (RCD) em concretos e argamassas. Cita-se Leite (2001), Zordan (1997), Cairns et al. (1998), Miranda (2000) Angulo (2000), Fonseca (2002), Alaejos et al.(2004), Etxeberria et al. (2004), Oikonomou (2005), Tam et al. (2005) e Buttler (2007).

Alguns resíduos já se consolidaram como subproduto. É o caso da sílica de ferro silício, da sílica da casca do arroz, da metacaulinita e de outros materiais com propriedades pozolânicas que estão sendo utilizados para as mais diversas aplicações de compósitos a base de cimento Portland. Cita-se Almeida (1996), Silva, I. (2000), Bentur & Cohen (1987), Paulon (1996), Liborio, Melo & Silva (1998), Aïtcin (2000), Grande (2003), Bardella et al. (2005).

Damtoft et al. (2008) argumentam que a indústria de cimento contribui positivamente para as iniciativas de minimizar os impactos da mudança climática nos seguintes aspectos:

- redução dos níveis de emissão de CO₂ na produção de cimentos pelo uso de biocombustíveis ou combustíveis alternativos e produção de cimentos com níveis reduzidos de clínquer;
- desenvolvimento de compósitos de concreto de elevado desempenho;
- potencial de reciclagem do concreto (do próprio material e/ou de incorporação de resíduos agroindustriais);
- potencial de se utilizar as propriedades térmicas do concreto para criar soluções de otimização de energia de aquecimento ou refrigeração de edifícios.

Em meados de 2005, durante o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) foi publicado um acordo firmado por 16 fabricantes de cimento, listando os indicadores de performance de sustentabilidade da indústria de cimento, que incluem: iniciativas de mensuração e redução de níveis de emissão de CO₂; especificação do consumo energético de produção de clínquer, bem como o compromisso de utilização de fontes alternativas (queima de pneus inservíveis ou combustível advindo da biomassa); utilização de

matérias-primas alternativas na composição de cimentos (escórias, fileres); programas de segurança no trabalho e; impactos locais da implantação da indústria (bem como as medidas de mitigação e recuperação dos mesmos). (DAMTOFT, 2008)

As considerações deste item são importantes para que se vislumbre o potencial de agregar ao painel alveolar matérias-primas alternativas na composição do microconcreto, obviamente desde que respeitados os critérios que garantam segurança e salubridade aos usuários finais.

2.2.1.2. Ferramentas de gestão de projeto (*green building tools*)

Atualmente, na comunidade européia, Estados Unidos, Canadá, Austrália, Japão e Hong Kong adotam um sistema de avaliação e classificação de desempenho ambiental de edifícios.

Existem diversas ferramentas que orientam a tomada de decisões tecnológicas no âmbito da construção civil com ênfase em LCA, as chamadas *Green Building Tools*. Segundo Trusty (2000), esses métodos de avaliação ambiental são divididos em três níveis: 1) Comparação de produtos e base de dados; 2) Suporte de decisão do edifício como um todo; 3) Suporte sobre sistemas estruturais e outros subsistemas.

As ferramentas mais conhecidas são a BREEAM, desenvolvida no Reino Unido e a LEED, desenvolvida nos Estados Unidos, segundo Edwards & Bennett (2003). A maioria das ferramentas está desenvolvida numa abordagem *bottom top*, isto é, a soma e combinação do desempenho dos diversos materiais e componentes do edifício resultam em grande parte no desempenho global do mesmo, apesar de se considerar o edifício no seu todo, incluindo as necessidades energéticas Erlandsson & Borg (2003).

Guggemos (2003) analisa os diversos tipos de softwares de avaliação ambiental existentes nos três níveis de atuação, além de desenvolver um banco de dados específico para a determinação de demanda energética e emissões de poluentes durante o processo de construção de edifícios em estrutura de concreto ou metálica denominado CEDST – *Construction Environmental Decision Support Tool*.

Mateus (2004) expõe que a análise da sustentabilidade de um edifício deve ser realizada de forma integrada e sistêmica. O autor expõe a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC) na qual a sustentabilidade das soluções construtivas é avaliada, para cada elemento construtivo, relativamente à solução mais aplicada em

âmbito local (denominada de solução de referência). Nesta metodologia são consideradas três dimensões: ambiental, funcional e econômica, conforme Figuras 2.1 e 2.2.

Figura 2.1 - Abordagem integrada de Análise de Ciclo de Vida de um edifício. Fonte: Mateus (2004)

Parâmetros		
Ambiental	Funcional	Econômica
Potencial de aquecimento global (PAG);	Isolamento sonoro a sons de condução aérea;	Custo de construção;
Energia primária incorporada (PEC);	Isolamento sonoro a sons de percussão;	Custo de manutenção;
Conteúdo reciclado;	Isolamento térmico;	Custo de reabilitação;
Potencial de reciclagem;	Durabilidade;	Custo de desmantelamento/demolição;
Potencial de reutilização;	Comportamento ao fogo;	Valor residual;
Quantidade de matéria/recursos naturais utilizados;	Impermeabilidade;	Custo do tratamento para devolução ao ambiente natural.
Toxicidade;	Estabilidade;	
Acidificação;	Comportamento sísmico;	
Eutrofização das reservas de água;	Construtibilidade;	
Quantidade de água incorporada.	Flexibilidade;	
	Inovação e desenho.	

Figura 2.2 - Parâmetros ambientais, funcionais e econômicos potencialmente aplicáveis à metodologia de avaliação MARS-SC. Fonte: Mateus (2004)

Silva; Silva e Agopyan (2003) relatam que o sistema de avaliação de sustentabilidade denominado GBC (*Green Building Construction*) interpreta diferentes prioridades, tecnologias, tradições construtivas e valores culturais de diferentes regiões (até mesmo em um mesmo país) e que esta é a vertente mais adequada para o desenvolvimento de softwares de avaliação. O Brasil integra este programa através do Programa Nacional de Avaliação de Impactos Ambientais de Edifícios (BRAiE) coordenado pela UNICAMP.

A rede Habitare de pesquisa através da FINEP divulga as ações do Grupo de pesquisa Morar de Outras Maneiras da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais que trabalha na elaboração de um banco de dados de sistemas, componentes e processos com a idéia de democratizar o acesso aos recursos técnicos e auxiliar projetistas e construtores nas decisões de projeto e construção, especialmente de habitações sociais realizadas por autoconstrução de gestão participativa.

A pesquisa integra o projeto: interface digital de apoio à construção de moradias: princípios, componentes e processos para a construção coordenada modularmente (FINEP) sistema IDA, sendo que uma versão preliminar está disponível no link: <http://www.mom.arq.ufmg.br/09_ida/idabanco4>. (HABITARE, 2009)

Nakamura (2006) ressalva, que apesar do desenvolvimento de sistemas de avaliação, a sustentabilidade deve ser reconhecida como um conceito aberto, passível de interpretações (não se tratando de mera pontuação matemática), que muitas vezes independem de alta tecnologia e sistemas construtivos inovadores.

Neste contexto, o desenvolvimento de alternativas em painéis alveolares incorpora à gestão de projeto um parâmetro diferenciado de sustentabilidade tanto tecnológica, devido ao emprego de materiais de forma racionalizada e ambientalmente amigável, quanto técnica e produtiva, por meio do *design* de produtos e de projeto para produção (processos), o que possibilita, em visão abrangente em termos do projeto de edificação com sistemas construtivos flexíveis.

2.2.2. Bases para as ações de política tecnológica de sustentabilidade da construção civil.

Considerando que a construção é vital para a concretização das metas nacionais de desenvolvimento sócio-econômico e que, no entanto, como já foi exposto, essa indústria se confirma como uma fonte de danos ambientais, por meio do esgotamento de recursos naturais, da degradação de paisagens urbanas e de áreas ambientalmente frágeis, da contaminação

química e do uso de materiais de construção nocivos para a saúde humana, é importante traçarmos um plano objetivo das ações que envolvem o desenvolvimento sustentável desse setor.

Para se ter uma idéia da dimensão do setor da construção brasileiro, vale citar que a participação do setor da construção no PIB total do Brasil é da ordem de 9%, sendo 37,5 % a participação do PIB da construção em relação ao PIB industrial, segundo dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2003).

Demamboro et al. (2003) concluem que o setor da construção civil é chave para o desenvolvimento do país e que, portanto, tem contribuído substancialmente para o equacionamento dos graves problemas nacionais.

Somente na questão da habitação, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2000), o déficit habitacional no País em 2000 era de aproximadamente sete milhões de unidades habitacionais concentrado principalmente nas Regiões Metropolitanas. Deste montante, 95% encontram-se entre famílias com renda de até três salários mínimos mensais.

A AGENDA 21 (1998) determina que os objetivos de implantação de ações de implantação de conceitos de sustentabilidade na construção sejam:

- Primeiramente, adotar um plano estratégico apropriado e em conformidade com planos, objetivos e prioridades nacionais;
- Estabelecer e fortalecer uma indústria autóctone de materiais de construção, baseada, na oferta local de recursos naturais, técnicos e humanos por meio de programas de capacitação e incentivo que aumentem a viabilidade econômica das empresas informais e de pequeno porte;
- Estimular o uso de materiais locais e de sistemas e tecnologias tradicionais de construção³ que façam uso intensivo da mão-de-obra para a geração de emprego e renda.
- Implementar e regulamentar normas calcadas no desempenho energético de projetos e tecnologias que utilizem os recursos naturais de forma racional e sustentável;
- Formular Planos Diretores e políticas integradas de regulamentação e planejamento de uso e ocupação do solo;

³ Fato que em princípio inviabilizaria a industrialização do setor quando se preconiza que tal conceito é referente às medidas de planejamento para aumento da produtividade com o mínimo recurso e desperdício, pois freqüentemente cabe à adoção de técnicas tradicionais o paradigma do atraso tecnológico e da falta de controle de qualidade. Entretanto, a aplicação de conceitos fundamentais da industrialização não significa empregar menos mão-de-obra, pelo contrário, o desenvolvimento deste trabalho tem como fundamento a apropriação desses conceitos para o emprego de mão-de-obra local e sem capacitação.

- Desenvolver políticas e práticas que atinjam o setor informal e os auto-construtores por meio de investimentos subsidiados, quando possível, ou de crédito facilitado ao setor informal.

- Promover o livre intercâmbio de informações entre os agentes envolvidos sobre todos os aspectos ambientais e sanitários da construção, evoluindo para o desenvolvimento e disseminação de bancos de dados sobre os impactos ambientais relativo aos materiais e técnicas de construção, visando à transferência de tecnologia entre todos os países, em especial os em desenvolvimento, implicando no correto manejo dos recursos destinados à construção, especialmente os não-renováveis e na implementação de programas de estímulo ao uso de tecnologias sem resíduos e limpas;

- Legislar sobre incentivos financeiros para as práticas que promovam a reciclagem e a conservação de energia nos métodos de produção dos materiais de construção;

- Desestimular o uso de materiais e produtos de construção ambientalmente impactantes através de instrumentos econômicos, como sobretaxas;

- Promover a um contínuo processo de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) nas indústrias da construção e estabelecer e fortalecer vínculos de instituições de ensino e pesquisa com esse setor;

- Desenvolvimento dos recursos humanos e capacitação institucional e técnica através da assistência dos organismos internacionais de apoio e financiamento aos pequenos empresários e trabalhadores e supervisores da indústria de materiais de construção, mediante diversos métodos de treinamento;

- Implantar programas gerais de ensino e conscientização dos construtores acerca das tecnologias sustentáveis disponíveis;

- Convocar e capacitar as autoridades locais a desempenhar um papel pioneiro na promoção da intensificação do uso de materiais e tecnologias de construção sustentáveis.

Percebe-se que as ações destacadas configuram um sistema complexo de planejamento intersetorial relativo ao desenvolvimento dos recursos humanos e à capacitação institucional e técnica, cuja implantação depende de um ambiente propício à introdução de políticas de integração dos recursos e atividades do setor público, do setor privado e da comunidade ou setor social.

Finalmente, os reflexos da adoção de um planejamento estratégico e integrado no setor implicam em desenvolvimento urbano, melhoria da qualidade dos assentamentos humanos, preservação e diminuição da degradação de paisagens urbanas e áreas de proteção ambiental, geração de emprego e renda, melhoria dos índices de desenvolvimento humano.

2.3. ESTRATÉGIAS DE IMPLANTAÇÃO DA MUDANÇA DE PARADIGMA

2.3.1. Ações relativas aos recursos humanos

Silva, M. (2000) afirma que existe a necessidade de um amplo programa de qualificação dos recursos humanos de todos os agentes da Construção Civil, incentivando a formação generalista dos profissionais da construção civil, em todos os níveis, buscando capacitá-los se adaptar às mudanças do ambiente e com ênfase no gerenciamento e permitindo, segundo Carvalho & Saurin (1995) e Pereira (2005) a fixação da mão-de-obra, através de uma estratégia de qualificação e polivalência.

Formoso (2002) e Ministério da Ciência e Tecnologia (2000) identificam um conjunto de premissas para a qualificação profissional, transcritas abaixo:

- O envolvimento de sindicatos e outros organismos na conscientização e na implantação de projetos de qualificação profissional;
- A união de esforços entre os diversos agentes da cadeia de forma que a qualificação seja integrada dentro de um programa de ação com visão sistêmica;
- Os centros de excelência e os agentes de capacitação devem ser identificados e mapeados, estimulando-se a realização de programas de formação de instrutores e multiplicadores nos mesmos por meio de ações de disseminação e informação coordenadas entre si;
- Estabelecer e criar indicadores e mecanismos de reconhecimento da qualificação adquirida na cadeia produtiva, como forma de indução ao esforço de treinamento.

Silva, M. (2000) aponta a necessidade de que essas ações sejam aplicadas a uma ampla gama de profissionais, envolvendo desde o corpo docente de escolas técnicas e universidades, os empresários, os profissionais de planejamento e promoção de empreendimentos, os profissionais de agentes promotores e financiadores de empreendimentos, projetistas, gerentes de produção, trabalhadores e os profissionais relacionados à gestão da operação e uso e avaliação pós-ocupação de edificações.

2.3.2. Ações relativas à implantação de infra-estrutura de tecnologia industrial

O Ministério da Ciência e Tecnologia (2001) destaca as seguintes necessidades:

- Avanços no sistema de normalização técnica, tornando-o mais ágil, abrangente, atualizado e participativo;

- Disseminação da produção científica e tecnológica de referência para suprir a carência de códigos de prática e guias de práticas recomendadas que consolidem procedimentos bem sucedidos de projeto e produção e que sirvam de complemento às normas técnicas, diplomas legais e programas de qualidade;

- Desenvolvimento de um Sistema de Aprovação Técnica para tecnologias inovadoras, principalmente para o segmento habitacional, considerando a escala de produção necessária para combater o déficit habitacional, é necessário que essa aprovação tenha credibilidade que resulte em aceitação das inovações tecnológicas;

- Incentivar e implementar programas de avaliação de conformidade de produtos convencionais de forma a reduzir riscos e custos de controle para o consumidor;

- Ampliar a capacitação laboratorial no país para atender tanto as demandas de prestação de serviços, como para a realização de pesquisas tecnológicas;

- Exigir dos fabricantes e prestadores de serviços a certificação de sistemas de gestão da qualidade. Essa é uma prática que vem se consolidando no país, principalmente na gestão pública, destacando-se o Sistema de Qualificação de Empresas de Serviços e Obras (SiQ), criado no âmbito do PBQPH coordenado pela Secretaria de Desenvolvimento Urbano (SEDU) do Ministério das Cidades;

- implementar outros tipos de certificação de sistemas de gestão, tais como de gestão ambiental (série de normas ISO 14000) e de gestão da higiene e segurança do trabalho.

2.3.3. Ações de integração da cadeia produtiva

Essa gestão se configura numa das maiores dificuldades de modernização do macrocomplexo, tendo em vista a quantidade e a especificidades dos agentes envolvidos

Silva, M. (2000) afirma que são necessárias ações político-institucionais neste cenário para incentivar o desenvolvimento conjunto de capacitação competitiva por meio da articulação planejada e sistemática entre os agentes.

Ravetz (2008) e Barret et al. (2008) ressaltam que as ações de integração da cadeia produtiva e a gestão de suprimentos são de fundamental importância inclusive para a mitigação de impactos ambientais. Ravetz (2008) conclui que o impacto de uma edificação com relação à emissão de gases poluentes suscita em toda a cadeia de suprimentos um impacto dez vezes maior.

Formoso (2002) resalta que os órgãos promotores e de financiamento, principalmente públicos, deverão ter um importante papel nesta articulação, através da utilização de

mecanismos reguladores e de incentivo à integração da cadeia produtiva, citando o próprio PBQPH.

2.3.4. Introdução da gestão ambiental e da sustentabilidade nas decisões de projeto, uso e ocupação.

Conforme exposto anteriormente, a Construção Civil pode cumprir um importante papel na diminuição de impactos ambientais na medida em que utiliza uma grande quantidade de recursos naturais. Além disso, o usuário quando promove a utilização das edificações contribui para elevado consumo energético.

Configuram-se assim algumas ações relacionadas a esta estratégia:

- Adoção da análise do ciclo de vida do ambiente construído como novo paradigma de projeto, privilegiando soluções técnicas que aumentem a flexibilidade das edificações e facilitem reformas e que permitam a minimização dos custos de manutenção e operação das edificações;

- Utilização de materiais e componentes que resultem em menor impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida quer seja pela redução do desperdício ou pela possibilidade de incorporar e encapsular resíduos agro-industriais e urbanos em sua composição.

- Priorizar intervenções que minimizem o impacto ambiental em edificações e na infra-estrutura urbana já existentes, particularmente quanto ao consumo de recursos naturais, agravamento das condições de drenagem e abastecimento e conforto ambiental.

2.3.5. Inovações relacionadas à gestão e informação

A exemplo de outros setores industriais é preciso:

- aproximar as instituições de pesquisa e as empresas ligadas ao setor para a discussão, disseminação e ampliação de métodos de gestão;

- agregar em todas as etapas de concepção do produto (edifício) conceitos segundo *Construction Task Force* (1998), tais como: pensamento estratégico, visão sistêmica, capacitação de recursos humanos, qualidade, integração e consórcios;

- uso de tecnologia de informação nos processos gerenciais de forma a integrar o trabalho dos agentes do processo de construção.

2.3.6. Pesquisa e desenvolvimento de tecnologia aplicada de produtos, processos e sistemas construtivos

Essa estratégia é fundamental para a redução de custos, desperdícios, prazos e patologias construtivas. O foco do desenvolvimento de materiais, componentes e sistemas de construção deve ser a produtividade, a sustentabilidade e, conseqüentemente, a melhoria de desempenho técnico e também das condições de trabalho.

A introdução de produtos com a lógica de subsistema, baseados na montagem de componentes pré-fabricados tende a simplificar a gestão do processo de produção no canteiro de obras, implicando maiores exigências de projeto e planejamento da produção.

Essa estratégia depende fundamentalmente da integração das instituições de pesquisa e das empresas de construção, destacando-se os seguintes objetivos, segundo Formoso (2002):

- Desenvolvimento de novos materiais, componentes e elementos com lógica de subsistema na produção de componentes pré-fabricados e na sua instalação no canteiro de obras.
- Implementação da coordenação modular e a melhoria da conectividade entre subsistemas.
- Desenvolvimento e aprimoramento de métodos de avaliação de desempenho de materiais, componentes e sistemas construtivos enfocando a viabilidade técnica, econômica e mercadológica de novas tecnologias, numa análise de LCA.
- Implementação de programas desenvolvimento tecnológico voltados especificamente a micro e pequenas empresas dos diversos setores que compõem o Macrocomplexo da Construção Civil. Neste momento, é fundamental citarmos o Programa PIPE da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo -FAPESP - que financia projetos de pesquisa para o desenvolvimento de produtos e processos tecnológicos inovadores apresentados por pesquisadores ligados a pequenas empresas sediadas no Estado de São Paulo. O programa se destina a apoiar o desenvolvimento de pesquisas inovadoras sobre importantes problemas em ciência, engenharia ou em educação científica e tecnológica que, em caso de sucesso, tenham alto potencial de retorno comercial ou social.
- Desenvolvimento de processos e produtos destinados à implantação, reforma e recuperação de edificações e de assentamentos urbanos, principalmente no que se refere ao saneamento ambiental.

- Desenvolvimento de materiais, componentes e sistemas construtivos para autoconstrução, mutirão e melhoria ambiental de assentamentos precários, utilizando-se de conceitos de ecotecnologias.

- Desenvolvimento de *green tools* aplicáveis em programas de urbanização.

2.3.7. Ampliação do acesso ao crédito

Silva, M. (2000) e Formoso (2002) afirmam que a demanda na construção de habitações de interesse social depende da existência de mecanismos de financiamento à produção, que sejam eficazes, estáveis e capazes de criar condições viáveis que tendem a reduzir o grau de risco das operações de crédito.

Recentemente, o Conselho Curador do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço – CCFGTS – tem editado algumas resoluções de investimentos por meio de operações coletivas de crédito que permitiram um grande aporte de recursos subsidiados à população com faixa de renda de até três salários mínimos visando a produção de habitações de interesse social.

As ações do Estado têm sido aprofundadas, no sentido de desenvolvimento de modelos de avaliação do impacto econômico e social de programas de financiamento à habitação de interesse social de modo a permitir a aplicação de recursos com redução de taxas de juros e aumento de prazos e a criação de mecanismos (formais, de diminuição de risco e de avaliações) mais apropriados à população de baixa renda, como por exemplo, os subsídios.

2.3.8. Regularização e re-qualificação da cidade informal – responsabilidade territorial

A enorme desigualdade social do país acarretou a ocupação desordenada do espaço urbano em assentamentos precários. Há a necessidade de investimentos vultosos de melhoria da qualidade das habitações, infra-estrutura e equipamentos urbanos, principalmente nos grandes centros metropolitanos.

Quanto ao ambiente construído, é preciso investir em mecanismos eficazes de processos de autogestão do habitat (autoconstrução ou mutirão), por meio da assistência técnica cooperativa aliada a programas de qualificação profissional, regularização fundiária e implantação de serviços urbanos, especialmente em áreas degradadas. FORMOSO (2002).

Os municípios deverão implantar políticas públicas com diretrizes relacionadas principalmente à participação da sociedade nas decisões, preservação ambiental e justiça social ao acesso aos benefícios do processo de desenvolvimento urbano.

Neste contexto, a apropriação de tecnologias e processos de construção baseados em princípios como a racionalização e pré-fabricação têm papel fundamental no efetivo combate ao déficit habitacional e re-qualificação de assentamentos precários.

Waddell (2008) enfatiza que a implantação de leis e códigos é um dos meios mais rápidos e eficazes que o poder público possui para promover as mudanças no setor da construção civil, entretanto, é preciso cautela no tratamento das edificações existentes como forma de prevenir a degradação ambiental e urbana decorrente da inviabilidade técnica de adequação destes imóveis.

2.3.9. Disseminação da informação e da produção científica aplicada

Formoso (2002) afirma a necessidade de estabelecer melhores canais de comunicação com o objetivo de comunicar mais claramente as demandas existentes em termos de desenvolvimento tecnológico e de inovações no setor produtivo.

Algumas ações têm se destacado como o INFOHAB - Centro de Referência e Informação em Habitação (INFOHAB, 2001), criado através de um projeto de pesquisa financiado pelo Programa Habitare, com recursos da FINEP, CNPq - Programa RHAIE e Caixa Econômica Federal, que hoje se constitui na principal biblioteca virtual deste setor.

Existem no âmbito do Ministério das Cidades várias ações concretas que são compartilhadas por meio de fóruns, bibliotecas virtuais e publicações relativas às áreas aqui explanadas, fazendo com que as experiências e estudos realizados sejam objetos de transferência de conhecimento.

Entretanto, considerando a peculiaridade deste trabalho principalmente na questão da apropriação de tecnologias e processos construtivos baseados na pré-fabricação, é fundamental a criação de mecanismos para melhorar a acessibilidade às informações técnicas de produtos e processos da construção civil para os participantes da construção informal, quer seja pela capacitação e qualificação desses agentes, quer seja pelo estreitamento das relações entre as instituições de pesquisa, órgãos governamentais e sociedade.

Neste particular, essa tese tem participação no projeto HABITARE, Chamada Pública MCT/FINEP/FNDCT/CAIXA - HABITARE - 01/2006 sob o tema: Desenvolvimento e Difusão de Tecnologias Construtivas para a Habitação de Interesse Social; sendo que dentre as metas deste projeto consta o desenvolvimento de painéis cimentícios pré-moldados modulares.

2.4. CONSIDERAÇÕES SOBRE A SUSTENTABILIDADE E A RACIONALIZAÇÃO DE PROCESSOS CONSTRUTIVOS NO BRASIL

Oliveira (2002) expõe uma visão história da construção pré-fabricada, em especial aos elementos de concreto armado, relatando que o seu surgimento e desenvolvimento se deram principalmente no continente europeu no período pós 2ª Guerra Mundial. Oliveri (1972) confirma essa manifestação relacionando-a a necessidade de reconstrução dos países massacrados durante o conflito.

A construção pré-fabricada (admitindo-se que neste momento que se trata de uma das manifestações da industrialização da construção de edifícios) evoluiu conceitualmente de um sistema fechado para um sistema aberto a partir da década de 50.

A consolidação de uma construção pré-fabricada de sistema aberto somente se faz através da conectividade e compatibilidade de componentes de origens diversas e isso somente vem sendo aplicado desde meados da década de 80 e início de 90.

Tais fundamentos são a base de processos de produção flexíveis sendo que a condição tecnológica de concretizá-los é por meio de sistemas construtivos racionalizados, desenvolvidos a partir de uma coordenação modular que possibilite a conectividade de diferentes produtos ou componentes.

Oliveira (2002) relata outro importante fator para a concretização de processos produtivos em sistema aberto: a normalização. A autora menciona que a construção de edifícios à base de painéis pré-fabricados na Europa e nos Estados Unidos têm como referência as normas da *British Standards Institution* (BSI), do *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB) e pela *Precast Concrete Association* (PCA).

No Brasil, como não houve uma crise aguda em decorrência dos conflitos mundiais, a situação foi se conformando gradativamente com a industrialização do país e, conseqüentemente, o crescimento populacional dos centros urbanos.

Nossa realidade calcada na exploração de recursos naturais pela metrópole portuguesa começou a apresentar alguma mudança significativa no setor da construção civil a partir da promoção da cidade do Rio de Janeiro a capital do reino, com a expansão da atividade cafeeira e com a consolidação dos primeiros centros urbanos, conforme Farah (1996) e Andrade (1994).

Nesta época a alvenaria de tijolos começou a substituir os processos artesanais de taipa na construção de edifícios. O início do século XX marcou uma notória evolução dos

materiais, técnicas e métodos construtivos, uma vez que se pode constatar nas obras remanescentes deste período uma primorosa execução.

Gradativamente as práticas de construções evoluíram para a utilização de uma estrutura de concreto armado independente da alvenaria de fechamento executada em tijolos cerâmicos (maciços e furados) e posteriormente blocos de concreto e de concreto celular autoclavado. (FARAH, 1996)

O crescimento do déficit habitacional fez com que o governo federal criasse em meados da década de 60 o Banco Nacional da Habitação (BNH), com a finalidade de implementar políticas de incentivo ao setor da construção habitacional. No entanto, conforme a característica sócio-econômica brasileira, o BNH adotou uma prática de estímulo aos sistemas construtivos tradicionais ou alternativos (como o solo-cimento) que fizessem uso intensivo da mão-de-obra. Oliveira (2002) cita que somente na segunda metade da década de 70 houve uma reorientação dessa atuação, passando a privilegiar a introdução de novas tecnologias e elementos pré-fabricados de concreto armado.

Entretanto, a falta de desenvolvimento científico e tecnológico acarretou muitos problemas patológicos nestes edifícios, o que veio a agravar ainda mais a rejeição pelos sistemas construtivos industrializados no Brasil. Define-se desenvolvimento tecnológico como o processo de aperfeiçoamento de métodos, técnicas, recursos, de gestão e processos que representem uma inovação tecnológica, segundo Sabbatini (1989).

A ausência de uma política de desenvolvimento tecnológico que implicasse na industrialização da construção de edifícios, aliada a uma crise econômica de índices inflacionários exorbitantes, desencadeou no declínio das políticas de financiamento do BNH. As poucas iniciativas de melhoria dos processos construtivos na área habitacional foram isoladas. A Associação Brasileira da Construção Industrializada - ABCI (1980) aponta que essa é a razão pela qual os processos construtivos industrializados sobreviveram apenas nos empreendimentos industriais, comerciais e de prestação de serviços.

Holanda (2003) acrescenta que a valorização fundiária decorrente do processo de urbanização contribuiu para relegar em segundo plano a busca da modernização da construção civil brasileira, uma vez que a rentabilidade dos capitais dos agentes promotores estava assegurada pelo próprio contexto econômico e social.

Tal panorama foi favorecido pela falta de uma política estatal para o setor. Segundo Vargas (1994b) sendo que os governos não exigiram a modernização e estes eram os principais financiadores da produção habitacional em massa.

Oliveira (2002) destaca que devido às modificações econômicas sofridas pelos grandes centros urbanos brasileiros, que fez surgir uma demanda por serviços (hotéis, flats, shopping centers, centros de convenções etc) os agentes promotores se interessam por processos construtivos que viabilizem o retorno mais rápido do capital investido, ou seja, empreendimento que são executados em prazos mais curtos e com padrões estéticos diferenciados, fazendo com que os elementos pré-fabricados voltassem a ser uma opção atraente.

Sabbatini (1998) ressalta que a modernização da construção civil é uma exigência da sociedade e que temas relativos ao alto índice de desperdícios, atraso tecnológico, baixa capacitação da mão-de-obra e a carência de inovações dos processos construtivos, são discutidos por toda coletividade. O autor defende que a competitividade do setor favorece novos investimentos e a modernização da cadeia.

As ações que visam a mudança de paradigma são recentes, conforme exposto nos capítulos anteriores. Sacomano (1998) destaca que na década de 90, a construção civil, passou a sofrer pressões dos vários setores econômicos e empresariais que compõem os agentes envolvidos no macrocomplexo, para que as empresas de construção tivessem uma inserção de potencial competitivo e de novas tecnologias de processo. Maldaner (2003) ressalta que tais investidas se baseiam na procura da competitividade, da qualidade e do melhor entendimento do papel da manufatura do setor.

Carpinetti e Rossi (1998) completam este raciocínio dizendo que nos anos 90 ocorreu uma transição para uma política industrial que procurava incentivar a competitividade seguindo a tendência global.

De fato existiu um grande movimento das empresas de construção civil visando a implantação e certificação de programas de melhoria da qualidade de seus produtos e processos.

Barros (1998) destaca o surgimento da alvenaria racionalizada no início da década de 90 como uma das primeiras ações voltadas à racionalização do processo construtivo tradicional, formalizada inclusive por convênios de desenvolvimento tecnológico entre a Universidade de São Paulo e empresas e entidades como a Encol, Sical, a Construtora Método Engenharia e o Centro Brasileiro de Construções e Equipamentos Escolares (CEBRACE).

Sacomano (1998) acredita que o termo “estratégia da manufatura”, conceito bastante difundido no setor metal-mecânico, mas de pouco conhecimento e aplicabilidade na construção civil, principalmente nas empresas de pequeno e médio porte, identifica-se plenamente com as necessidades das empresas, pois a estrutura de pensamento global do

setor, desde a elaboração do orçamento de obra até a consecução da execução é vista por processos.

Holanda (2003) afirma que a competitividade estabelecida atualmente no setor de construção de edifícios influencia positivamente a modernização do setor, pois faz com que as empresas introduzam conceitos de racionalização, industrialização, qualidade e organização como parâmetro de competência e aptidão ao mercado.

Maldaner (2003) afirma que uma das formas de conseguir melhorias dos processos produtivos da construção civil é diretamente ligada à implantação de procedimentos que possibilitem mensurar e identificar quais processos que resultam em melhor produtividade.

Constatamos que os conceitos expostos travam um diálogo com a sustentabilidade das decisões de projeto e execução de edifícios, uma vez que a melhoria de gestão acarreta da redução (menores desperdícios de recursos), reaproveitamento (implantação de ciclos de produção fechados nas diversas cadeias que interagem com o produto edifício) e a reciclagem (através da interação plena do setor com outros setores industriais agro-urbanos).

De fato, Assefa et al. (2007) relata que as causas dos impactos ambientais que a construção de edifícios são múltiplas, e a responsabilidade sobre seus efeitos deve necessariamente ser compartilhada pelos projetistas, proprietários, arquitetos, engenheiros, instituições financeiras, governos e demais agentes da indústria da construção civil. Diante disso, engenheiros e arquitetos ocupam uma posição estratégica na mudança de paradigma, uma vez que são os responsáveis diretos pela especificação de materiais e sistemas construtivos.

É neste contexto que ressaltamos a importância de se apropriar tais conceitos para o desenvolvimento de um componente diferenciado e que permite a aplicação prática das discussões aqui fundamentadas.

2.4.1. Considerações sobre pré-fabricação de componentes de concreto

Silva (2003) afirma que a pré-fabricação é um método industrial de produção em série. Este conceito é intrinsecamente ligado ao de pré-moldagem, já que esta última, quando aplicada à produção em grande escala, resulta na pré-fabricação.

O autor expõe que o emprego de estruturas de concreto pré-fabricado está diretamente relacionado com o grau de desenvolvimento social e tecnológico do país. Contudo, características regionais/culturais também influenciam seu emprego. Há uma forte tendência de aumento de utilização de pré-moldados, principalmente em países em desenvolvimento.

No Brasil, a tecnologia de concreto pré-fabricado ainda é tímida, representando apenas cerca de 10% do consumo de cimento produzido no país, segundo El Debs (2000).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2006), que trata especificamente do projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado, traz as seguintes definições:

- Elemento pré-moldado: elemento que é executado fora do local de utilização definitiva na estrutura, produzidos em condições menos rigorosas de controle de qualidade.

- Elemento pré-fabricado: elemento pré-moldado, executado industrialmente, mesmo em instalações temporárias em canteiros de obra, sob condições rigorosas de controle de qualidade.

Portanto, de acordo com esta norma, quando os elementos pré-moldados são produzidos segundo um controle de qualidade mais rigoroso são chamados de elementos pré-fabricados. A NBR 9062 especifica claramente o padrão de controle de qualidade mínimo a ser atendido na produção destes dois tipos de elementos.

El Debs (2000) e Silva (2003) destacam que se tem buscado o emprego de elementos pré-fabricados de diferentes procedências, para que se viabilizem sistemas construtivos de ciclo aberto, por meio de:

- Desenvolvimento de elementos pré-fabricados que possuam diversidade de aplicação, bem como, diversificação dos tipos de elementos produzidos;
- Flexibilidade de produção, onde se pode mudar rapidamente o tipo e padrão dos elementos pré-fabricados produzidos;
- Terceirização dos serviços de montagem, o que facilita a livre concorrência.

Os autores defendem que a implantação do sistema de produção de ciclo aberto tem proporcionado aumento do emprego de pré-fabricados, já que o mesmo além de tornar a indústria de pré-fabricados mais atraente do ponto de vista comercial ainda possibilita certa plasticidade e flexibilidade na concepção de projetos.

2.4.2. Características da pré-fabricação

Segundo El Debs (2000), a utilização de elementos pré-fabricados apresenta os seguintes benefícios:

- Rapidez na execução;
- Redução de desperdícios;
- Facilidade de controlar a qualidade dos produtos;
- Redução ou eliminação de cimbramento;

- Melhores condições de trabalho;
- Facilidade na implementação dos programas de segurança no trabalho.

Entretanto, o autor apresenta desvantagens, tais como:

- Custo inicial relativamente mais alto, principalmente em curto prazo;
- Necessita de demanda mínima (que justifique a produção em série);
- Necessidade de maior espaço físico, tanto para montagem como para produção, já que utiliza equipamentos de grande porte;
- Qualificação dos trabalhadores envolvidos (especialmente na montagem);

Silva (2003) destaca alguns exemplos comuns de classificação de pré-moldados:

- Os elementos podem ser produzidos tanto no canteiro da obra, como em local distante da mesma. Segundo este critério existem pré-moldados de fábrica ou de canteiro.

- Os elementos pré-moldados podem ser produzidos já com seção plena ou podem receber in loco aumento de sua seção resistente e assim têm-se elementos pré-moldados de seção plena ou elementos pré-moldados de seção parcial, respectivamente. Os elementos de seção parcial quando complementados passam a ser chamados de elementos compostos.

- Conforme o porte de equipamentos para transporte e montagem. Consideram-se, segundo este critério, três tipos de elementos: até 0,3KN elementos leves, de 0,3 a 5,0KN elementos de peso médio e acima de 5KN elementos pesados.

- Segundo a preocupação estética com o pré-moldado, o mesmo pode ser pré-moldado normal ou pré-moldado arquitetônico (geralmente utilizados em fachadas ou locais em que os mesmos são visíveis).

2.5. A TECNOLOGIA DE PAINÉIS ALVEOLARES DE CONCRETO ARMADO

De acordo com o American Concrete Institute – ACI (1993), o componente construtivo painel pré-fabricado de concreto pode ser classificado quanto à geometria da seção transversal em:

- maciços: cuja seção é constituída por um único material;
- alveolares: cuja seção possui vazios em todo o comprimento da peça;
- sanduíches: cuja seção se configura por duas camadas de concreto nas faces externas separadas por um material não estrutural na camada interna;
- Nervurados: cuja seção apresenta nervuras com função de reforçar ou tornar a peça mais rígida.

Quanto à sua função no sistema construtivo, Krüger et al. (2002) definem três tipos de painéis:

- cortina: fixado à superestrutura (pilares, vigas e lajes) recobrimdo-a completamente;
- de vedação: semelhante ao painel cortina, no entanto, a superestrutura fica aparente;
- portantes: aqueles que suportam, além do seu peso próprio, as cargas das lajes e dos painéis superiores apoiados sobre as mesmas, dispensando pilares e vigas de sustentação.

Sabbatini e Franco (2001) classificam as vedações de painéis pré-fabricados quanto à:

- a) posição no edifício: externa ou interna;
- b) técnica de execução:
 - por conformação, ou seja, moldadas a úmido no local;
 - por acoplamento a seco, obtida por montagem através de dispositivos de fixação;
 - por acoplamento úmido: obtidas por montagem a seco e solidarização posterior com argamassa ou concreto;
- c) densidade: leve (entre 60 e 100Kg/m²) e pesada;
- d) estruturação: autoportante ou estruturada
- e) continuidade do pano (em relação à distribuição dos esforços): contínua ou descontínua;
- f) continuidade superficial (visibilidade das juntas): monolítica ou modular.

O Painel Alveolar disponível no mercado é constituído de concreto armado protendido e possui seção transversal com altura constante e alvéolos longitudinais, responsáveis pela redução do peso da peça. (HANAI 2005)

Estes painéis protendidos são geralmente produzidos em concreto de elevada resistência característica à compressão (f_{ck} aproximadamente de 45MPa) e com aços especiais para protensão. Estes componentes são geralmente fabricados nas largura de 100cm a 125cm e nas alturas de 9cm, 12cm, 16cm, 20cm, 25cm e 30cm e eventualmente variarem até 50cm, conforme o fabricante e as características do projeto. Normalmente esses elementos são projetados para funcionarem simplesmente apoiados.

A Figura 2.3 ilustra uma seção transversal de um Painel Alveolar com a descrição das partes que o constituem.

Figura 2.3 - Exemplo de seção transversal de painel alveolar. Fonte: www.tatu.com.br/ (acesso em 18/08/2009).

Painéis alveolares são os elementos pré-moldados mais empregados no mundo, em especial na América do Norte e Europa Ocidental. Estima-se que a produção mundial desse tipo de elemento é de 150 milhões de metros cúbicos por ano. Este elemento teve origem na Alemanha e tem evoluído ao longo dos anos, em termos de altura e de vão possível de ser vencido. A aplicação mais comum é em lajes, mas podem também ser empregado em sistemas de fechamentos. (EL DEBS, 2000), (CASTILHO, 2003).

No caso de lajes podem ou não ser compostos de uma capa de concreto moldado no local, formando seção composta. No caso de sistemas de fechamento podem ter camada adicional formando painel sanduíche.

Geralmente os painéis alveolares são também chamados de laje vazada ou oca. Os alvéolos desses elementos podem assumir forma circular, oval, “pseudo” elipse, retangular, etc.

Os alvéolos possuem a função de reduzirem o peso geral da peça e da estrutura e, em combinação com a protensão da armadura, proporciona peças capazes de cobrirem grandes vãos quando o elemento tem a função de laje.

Castilho (2003) expõe que na análise estrutural das lajes executadas com painéis alveolares admite-se que o comportamento do elemento corresponda ao de laje armada em uma direção. A faixa de vãos em que esse tipo de elemento é empregado está entre 5m e 15m.

O painel alveolar possui grande flexibilidade de utilização, de modo que ele é aplicável aos principais tipos de sistemas construtivos racionalizados, tais como: alvenaria, concreto e metal (FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE, 1992).

Normalmente são aplicados em sistemas de lajes alveolares ou painéis de fechamento, sendo especialmente dimensionados para resistir aos esforços de cisalhamento. Entretanto, existem muitas aplicações em que esses elementos estão também sujeitos a esforços de torção, como pisos com aberturas e pisos com extremidades inclinadas conforme Broo et al. (2004).

A ABNT (2002) define:

[...]- laje tipo painel alveolar protendido: Conjunto formado por painéis alveolares protendidos pré-fabricados, montados por justaposição lateral, eventual capa de concreto estrutural e material de rejuntamento.

- painel alveolar de concreto protendido: Denominado PACP, são peças de concreto produzidas industrialmente, fora do local de utilização definitiva, sob rigorosas condições de controle de qualidade, conforme a NBR 9062. São caracterizados por armadura longitudinal ativa e seção alveolar, definindo almas de concreto.

2.5.1. Pesquisas relacionadas a painéis alveolares

O painel alveolar é objeto de pesquisas em diversas áreas da engenharia, destacando-se: projeto, racionalização de canteiro de obras, desempenho estrutural (resistência mecânica ao cisalhamento de painel e/ou seção composta), conforto térmico e sustentabilidade. No entanto, a grande maioria das pesquisas trata deste elemento utilizado em lajes, uma vez que a aplicação de painéis pré-fabricados de concreto em fachadas ou painéis de paredes é mais freqüente nas configurações de painéis maciços, sanduíches, dry wall e painéis leves reforçados com fibra (GFRC).

EL DEBS (2000), analisou o dimensionamento de painéis alveolares produzidos em pistas de protensão, e apresentou as particularidades descritas a seguir.

- a armadura dos painéis é constituída apenas de armadura ativa, na parte inferior e, muitas vezes, também na mesa superior;
- não existe armadura especial para resistir à força cortante e nem para solicitações na direção transversal, o que obriga a contar com a resistência à tração do concreto para resistir a essas solicitações;
- a colocação de armaduras adicionais é praticamente inviável devido ao processo de execução e a colocação de conectores metálicos é usada em situações particulares.

Castilho (2003) avaliou a aplicação do método de Algoritmos Genéticos para otimização dos custos de produção deste componente (situação de fabricação) e quando utilizado como laje com e sem a capa superficial de concreto (situação de aplicação).

De acordo com *Comité Européen de Normalisation* (2005) as lajes alveolares podem apresentar diferentes mecanismos de ruptura:

- a) falha por perda da ancoragem;

- b) falha por cisalhamento (tensão no ponto crítico da nervura superior à resistência de tração do concreto);
- c) falha por cisalhamento em região fissurada (com efeito combinado de cisalhamento, flexão e escorregamento);
- d) falha por cisalhamento combinado com torção (em peças que não são planas);
- e) falha por flexão, com possibilidade de escorregamento da armadura ativa próximo à ruptura;
- f) falha por interação dos mecanismos de flexão e cisalhamento (em peças curtas com carregamentos altos)

Montedor et al (2006) demonstram as possíveis configurações de fissuras em ensaios de cisalhamento de lajes alveolares e conclui que o elemento pode apresentar ruptura por cisalhamento do concreto com fissuras inclinadas e por flexão ou por escorregamento dos cabos, com fissura vertical.

Migliore (2008) documentou as características da produção de painéis (lajes) alveolares, bem como sua aplicação em obra e comparou o consumo de materiais e de custo de implantação para os sistemas construtivos de lajes alveolares, nervuradas e treliçadas para uma simulação de pavimento com vão teórico de laje de 7,50m e carga accidental de 5,00 KN/m². Os resultados indicaram que o sistema de laje nervurada é mais econômico que os demais para as condições impostas, porém o sistema de laje alveolar permitiria suportar carregamentos mais elevados e vencer vãos maiores com a mesma espessura.

Ferreira et al. (2008) analisaram o comportamento de lajes alveolares ao cisalhamento, comparando várias situações de utilização (com e sem capa de compressão de concreto e com alvéolos preenchidos com concreto). Relatam que no Brasil ainda não existe uma normalização específica que oriente a padronização de projeto ou mesmo que estabeleça os critérios necessários de desempenho para a realização de ensaios de controle de qualidade, visando a certificação desse produto e concluem que a qualidade da ancoragem deste elemento à superestrutura é um fator muito importante para se evitar a ocorrência de rupturas frágeis, sendo que a resistência de tração do concreto é um dos parâmetros mais importantes de controle, pois a mesma influencia tanto na resistência ao cisalhamento quanto na eficiência da ancoragem.

Bayasi e Kaiser (2003) exploraram os efeitos da presença ou ausência de armadura passiva da camada de compressão e concluíram que a armadura é necessária para incrementar a resistência ao cisalhamento.

Alexander (2003) estudou a deformação de lajes alveolares de seção composta e seus mecanismos de fissuração, propondo um novo método de cálculo admitindo que a deformação máxima deste elemento seja dada pela relação $L/750$.

Hosny et al. (2006) analisaram o comportamento de lajes alveolares quando submetidas a carregamentos que resultam em momentos negativos e propuseram um mecanismo de reforço composto por uma fita de fibra de carbono aderida na face de topo de painéis alveolares nas zonas de incidência de momentos negativos com adesivo bi-componente a base de epóxi. Tal mecanismo promoveu um aumento da resistência e alteração da fissuração.

Girhammar e Pajari (2008) analisaram os mecanismos de colaboração da camada de compressão na seção composta e concluem que esta camada pode incrementar a capacidade de suporte de lajes alveolares em até 35% desde que a mesma interaja de maneira apropriada com a superfície do painel. Em certos casos, é econômico diminuir a seção do painel e aumentar a espessura da camada de compressão (geralmente constituída de concreto com qualidade inferior ao da peça pré-moldada). Foram avaliadas capas de compressão compostas por concreto armado convencional e concreto reforçado com fibras metálicas e verificou-se que não houve diferenças consideráveis entre os dois compósitos.

López-Mesa et al. (2009) estudaram o impacto ambiental sob o ponto de vista de Análise de Ciclo de Vida (LCA) de dois tipos de lajes: treliçada moldada in loco e alveolar. Os resultados apontam que o impacto ambiental da utilização da laje alveolar na estrutura de um edifício é 12,2% menor que a moldada in loco. Mesmo assim, aponta-se que esta tecnologia não é utilizada em construções habitacionais na Espanha (contexto semelhante ao Brasil). Os dados foram obtidos da comparação entre as duas soluções simuladas em edifício de 7 pavimentos. As Tabelas a seguir ilustram que a adoção de lajes alveolares resultou em menor consumo de material global da superestrutura:

Tabela 2.2 - Consumo comparativo de material entre laje moldada in loco e laje alveolar por fase do sistema estrutural – simulação para edifício de 7 pavimentos. Fonte: López-Mesa et al. (2009)

Elemento Estrutural	Sistema estrutural com laje moldada in loco	Sistema estrutural com laje alveolar
Características do edifício		
Área por pavimento/Total	430,00 m ² / 3010,00 m ²	
Nº pavimentos	7 (2 subsolos, térreo, 4 pav. Tipo)	
Vão entre pavimentos	5,80 m	
Vão entre apoios	5,20 m	8,00 m
Fundações		
Concreto	132,31 m ³	113,43 m ³
Aço	7057,68 Kg	5702,13 Kg
Taxa de armadura	53,34 Kg/m ³	50,27 Kg/m ³
Colunas		
Concreto	61,7 m ³	46,28 m ³
Aço	8372,41 Kg	6694,36 Kg
Taxa de armadura	136,00 Kg/m ³	145,00 Kg/m ³
Nº de colunas	24	18
Vigas		
Concreto	181,28 m ³	113,20 m ³
Aço	19661,26 Kg	10402,08 Kg
Taxa de armadura	136,00 Kg/m ³	145,00 Kg/m ³
Lajes		
Concreto	0,105 Kg/m ²	-
Aço nas juntas	1,75 Kg/m ²	1,02 Kg/m ²
Relação superfície de concreto/área de pavimento	5,469 m ² /m ²	1,10 m ² /m ²
Malha de distribuição	1,10 m ² /m ²	1,10 m ² /m ²
Armadura negativa	0,43 Kg/m ²	0,20 Kg/m ²

Tabela 2.3 - Diferenças de impacto ambiental nas diferentes partes/fases de sistema estrutural – simulação para edifício de 7 pavimentos. Fonte: López-Mesa et al. (2009)

Tipo de estrutura	Laje	Colunas	Fundações	Movimento de terra	Total
Utilizando laje moldada in loco	18,67 %	75,27 %	2,02 %	4,02 %	100%
Utilizando laje alveolar	27,91 %	64,47 %	1,91 %	5,71 %	100%
Diferença de impacto ambiental	+31,0 %	-24,8 %	-17,1 %	+24,7 %	-12,2 %

Tabela 2.4 - Diferenças de custo nas diferentes partes/fases de sistema estrutural – simulação para edifício de 7 pavimentos. Fonte: López-Mesa et al. (2009)

Tipo de estrutura	Laje	Colunas	Fundações	Total
Utilizando laje moldada in loco	82,93 %	8,06 %	9,01 %	100%
Utilizando laje alveolar	88,49 %	5,11 %	6,40 %	100%
Diferença de impacto ambiental	+25,8 %	-25,2 %	-16,3 %	+17,9 %

Shen et al. (2009), demonstram os benefícios (econômicos e ambientais) de substituir as lajes moldadas in loco por lajes alveolares através de dados coletados em informes estatísticos e estudo de caso. Os resultados apontam que a pré-fabricação é uma tecnologia viável para a redução significativa de custos e de geração de resíduos. Em termos de custos, a substituição proposta pode alcançar valores entre 43% a 70% variáveis conforme o porte do empreendimento e a escala de produção do elemento.

Quanto ao conforto térmico, os painéis alveolares proporcionam soluções interessantes. Barton et al. (2002) propuseram a utilização dos alvéolos em sistema de ventilação por ar insuflado e concluíram que este sistema atenua as variações de temperatura internas do ambiente e quanto mais longa for a passagem de ar nos alvéolos, melhor é o resultado, independentemente da área de sua seção. A Figura 2.4 demonstra o sistema proposto:

Figura 2.4 - Sistema de ventilação e exaustão utilizando painel de laje alveolar.
Fonte: Barton et al. (2002)

Öberg and Damtoft (2007) relatam que as propriedades térmicas do concreto tem potencial para a redução do consumo energético do edifício. Dentre os exemplos citados pelo autor destacam-se o uso de sistemas de circulação de ar natural insuflado nos alvéolos de lajes pré-fabricadas e a especificação destes elementos como painéis de fechamento externos.

Corgnati e Kindinis (2007) afirmam que a associação da massa térmica de um edifício e os sistemas de ventilação natural contribui para a redução da demanda por controle microclimático. Os autores destacam que um dos poucos elementos estruturais capazes de promover a troca eficiente de energia térmica com o ambiente é o painel alveolar. Foram

comparados dois sistemas de ventilação aferidos durante o dia e à noite, mantendo o quanto possível as condições de conforto durante o período de ocupação sem o uso de ar-condicionado:

- tradicional, no qual o ar externo é insuflado para o ambiente interno;
- alternativo, caracterizado pela circulação de ar insuflado que se desenvolve internamente nos “dutos” alveolares de painéis de lajes antes de adentrarem no ambiente.

Os resultados apontaram que o sistema de ventilação interno aos alvéolos garantiu um controle de temperatura de 1°C menor que o sistema tradicional.

2.5.2. Processos de produção do painel alveolar

Os painéis alveolares podem ser produzidos pela utilização de fôrmas fixas (moldada) ou, mais comumente, usando uma extrusora ou fôrma deslizante, em uma pista de concretagem, segundo El Debs (2000). Nos dois casos, os painéis são produzidos utilizando todo o comprimento da pista e, posteriormente, são serrados no comprimento desejado pelo cliente. A limitação da modulação do painel fica restrita apenas na largura da pista de protensão, com dimensões usuais de 1,00 a 1,25 metros.

2.5.2.1. Produção em fôrmas fixas

Segundo Melo (2004) e Migliore (2008), a produção dos painéis alveolares em fôrmas fixas é dividida em seis etapas, a saber:

- preparação da pista de protensão, na qual são eliminados os excessos de material da etapa de protensão anterior e realiza-se a aplicação de desmoldante;
- protensão da armadura por macaco hidráulico até alcançar a força de tração desejada em projeto. Esta força é verificada por meio do controle da pressão lida no manômetro do macaco de protensão
- posicionamento das formas dos alvéolos conformadas por tubos de aço. Para facilitar a retirada destes tubos é aplicado desmoldante em toda a sua superfície. O seu posicionamento é orientado por guias que garantem o devido espaçamento das faces;
- lançamento de concreto por gravidade. O espalhamento é realizado por método manual e o adensamento ideal é conseguido com o uso de vibrador de imersão. São necessárias equipes que trabalham simultaneamente no processo, realizando tarefas de espalhamento, adensamento e acabamento superficial;

- cura do concreto, normalmente a vapor a temperatura que varia de 40°C a 50°C, por período de tempo suficiente (de seis a oito horas) para que o concreto adquira resistência para que seja realizada a desprotensão;

- desprotensão, ou seja, o corte das extremidades das cordoalhas com disco abrasivo ou maçarico.

A Figura 2.5 representa as etapas de produção de painel alveolar em fôrmas fixas:

1) Vista geral da usina

2) Guia dos tubos internos e detalhe das armaduras

3) Detalhe do posicionamento dos tubos de aço

4) Extremidade do tubo de aço. Detalhe do dispositivo de arranque

5) Lançamento de concreto

6) Trabalho das equipes de espalhamento e adensamento

7) Acabamento superficial do painel (ao lado)

Figura 2.5 - Esquema de produção de painel alveolar em fôrma fixa, seqüência de 1 a 7. Fonte: Migliore (2008)

Uma variante deste processo é praticado pela empresa Alto Nível Construções Gerais Ltda. estabelecida em Descalvado, SP. A empresa produz painéis de Concreto Armado Alveolar Autoportante (PCAA) em dimensões moduladas que configuram painéis de paredes.

Basicamente, são dispostas fôrmas metálicas de bordo que contem furos guias para o transpasse de tubos metálicos no sentido longitudinal. A armadura é composta de tela eletrosoldada nas duas faces do molde. Os painéis alveolares são produzidos nas pistas, onde inicialmente são fixados os tubos, que formarão os alvéolos.

O concreto é lançado, adensado (por meio de vibrador pneumático e régua vibratória). Após 6 horas é feita a retirada dos tubos com equipamento sacador, configurando os alveolos internos e o painel recebe tratamento superficial para garantir um bom acabamento da face exposta com régua manual.

O concreto utilizado nos painéis alveolares possui $f_{ck}=20$ MPa (mínimo), e contém agregado graúdo com diâmetro máximo de 19mm, com aditivo superplastificante para maior

adensamento e melhor desempenho das peças. As armaduras são fios de aço de 3mm a 10mm de diâmetro dispostos em malha de 10 a 30cm nas duas faces dos painéis.

Os painéis são desformados no mínimo 24h após a concretagem e já podem ser transportados ao local da obra.

Uma característica desse processo é que a fôrma metálica de bordo é “perdida” ou incorporada ao painel. No entanto, a mesma é fundamental para a junção de painéis de parede nos cantos e encontros e seguimentos lineares executados com solda.

A Figura 2.6 representa as etapas de produção de painel PCAA:

- 1) Vista do painel de parede sobre a pista. Observar o vão de porta (acima)
- 2) Vista da pista de concretagem dos painéis (ao lado)

Figura 2.6 - Esquema de produção de painel alveolar PCAA – sequência 1 e 2

2.5.2.2. Extrusão

Várias empresas adotaram o processo de fabricação de painéis alveolares por extrusão pelo sistema europeu *Partec Extruding Process* ou o sistema *Shear Compaction Extruding* (extrusão compactada por compressão), o que garante maior resistência e menor porosidade do concreto.

Figura 2.7 - Esquema de produção de painel alveolar por extrusão

Neste processo de fabricação, a produção das lajes e painéis alveolares ocorre em instalações industriais providas de recursos necessários para garantir o controle de qualidade do material, bem como a estocagem das peças.

A moldagem das placas é feita em modernos equipamentos que através de vibração energética permitem a utilização de concretos dosados em centrais modernas que garantem excelentes condições de traços com baixa relação água/cimento ($a/c \approx 0,3$), que além da alta resistência à compressão (em média 45MPa), protege as armaduras com maior eficiência, por conta da baixa porosidade e adensamento ideal. Neste processo, uma cordoalha de aço é posicionada na pista e lhe é aplicada protensão antes da moldagem da peça.

Alguns equipamentos de extrusão são tão eficientes que dispensam procedimentos auxiliares para o acabamento superficial da peça. As pistas de concretagem possuem cerca de 150m de comprimento. A moldagem ocorre em um único painel, por extrusão, e depois é cortado. A Figura 2.8 ilustra a visão geral de uma usina de produção de painel alveolar.

1) Cordoalha – aço para protensão; 2) Cabeceiras de protensão; 3) Pista com laje alveolar já extrudada; 4) Pista com cordoalhas sendo posicionadas para fabricação de lajes; 5) Macaco de protensão de cordoalhas.

Figura 2.8 - Pista de concretagem de uma usina de pré-moldados. Fonte: www.r4tecno.com.br/ (acesso em 08/10/2008).

Em seguida são demonstrados detalhes das etapas do processo de fabricação dos painéis alveolares.

1) Detalhe da cabeceira da pista e aplicação de protensão na cordoalha

2) Pista preparada para a concretagem

3) Alimentação da extrusora

4) Moldagem do painel alveolar. Fonte: <http://www.weiler.com.br>

5) Acabamento superficial da peça

6) Corte do painel

7) Retirada da peça da pista de extrusão

8) Armazenagem de painéis

Figura 2.9 - Etapas de produção de painéis alveolares - sequência de 1 a 8

2.5.3. Diagnóstico das opções de mercado, dos módulos e dos padrões de conexão

Os painéis alveolares de concreto armado existentes no mercado são basicamente de três tipos diferenciados pelo grau de industrialização de seus processos produtivos, conforme resumido em seguida:

- os produzidos em fôrmas fixas em pistas de protensão;
- os moldados com concreto adensável sobre armadura de tela de aço eletrosoldada.

Neste caso os painéis são emoldurados por fôrma metálica (de bordo) contendo no sentido transversal furos que servem para a passagem de tubos metálicos que conformarão os alvéolos.

- aqueles produzidos por extrusão de concreto com baixa relação água/cimento em pistas de protensão;

Conforme exposto nos títulos anteriores, é possível perceber que os processos que utilizam fôrmas fixas demandam maior emprego de mão-de-obra na planta industrial para que se procedam as operações de preparação, posicionamento de armadura, protensão, concretagem e acabamento dos painéis. É visível que o processo de produção por extrusão é realizado com o mínimo de trabalhadores e estes realizam somente funções de operação de equipamentos.

Os três processos têm como característica um alto grau de industrialização do processo de fabricação das peças pré-moldadas, não permitindo a sua apropriação para processos produtivos manufaturados e ao mesmo tempo não sendo viável em construções habitacionais de interesse social por meio de programas de autogestão, uma vez que existe uma dependência direta da planta industrial e de uma logística de transporte mais complexa.

Com relação aos módulos produzidos, os padrões de mercado apontam para painéis de largura variável entre 1,00m e 1,25m e alturas (ou espessuras) que variam de 9cm a 50cm. O processo de produção de paredes alveolares (PCAAA) possui mais flexibilidade neste aspecto, pois permite produzir painéis com dimensões adaptadas ao projeto. As espessuras dos painéis podem ser de 75mm, 100 mm e 120mm, sua altura pode variar de 2,50m a 2,80m e seu comprimento pode chegar a 8,00m, proporcionando grande flexibilidade de dimensões.

A Tabela 2.5 demonstra as características de painéis alveolares de alguns fabricantes:

Tabela 2.5 - Especificações de alguns painéis alveolares disponíveis no mercado nacional.

Fabricante	Largura (cm)	Espessura (cm)	Peso próprio (KN/m²)
Tatu Pré-moldados	124,5	9	1,50
		12	2,10
		16	2,45
		20	2,80
		25	3,20
		20,5	2,90
		25 (pesado)	3,45
DM Construtora	120	30	4,00
		10	1,60
		14	2,00
		18	2,26
		21,5	2,70
		25,5	3,20
Munte Construções Industrializadas	120	31	3,70
		20	2,40
REAGO	120	26,5	3,10
		12	1,98
		16	2,48
		21	2,88
PREMO	125	25	3,23
		15	2,20
		21,5	2,90
PROTENDIT	125	26,5	3,80
		15	2,20
		20	2,80
CASSOL	125	24	3,10
		15	2,20
		20	2,80
		26	3,50
		32	3,90
		40	5,20
		50	6,80

É possível perceber que os módulos disponíveis no mercado são mais adequados ao atendimento de construções de plantas industriais e comerciais, uma vez que essas tipologias normalmente são implantadas sobre grandes lotes, necessitam de vãos livres e pouca compartimentação, sendo que esta normalmente é realizada de maneira independente da superestrutura.

A apropriação desta tecnologia para a aplicação em habitações necessita de mecanismos de flexibilização do módulo, uma vez que essa tipologia apresenta considerável compartimentação de ambientes, pequenos vãos e são implantadas em condições fundiárias complexas – lotes que possuem testadas variáveis de 5,00m a 10,00m e áreas geralmente compreendidas entre 125m² e 250m².

Em relação ao peso próprio do painel alveolar, percebe-se que para pequenas espessuras (9cm a 15cm) os valores variam entre 1,50 KN/m² a 2,20 KN/m², fato que já configura em potencial de utilização para obras de baixo custo, uma vez que as paredes de

alvenarias de tijolos cerâmicos maciços, furados ou de blocos de concreto, com espessuras de 9cm (tijolo/bloco) e revestimentos possuem peso próprio entre 1,4 KN/m² e 2,7 KN/m².

É importante destacar que no tocante à execução de painéis de parede em alvenaria convencional ou racionalizada, o consumo de material e mão-de-obra (horas/homem por metro quadrado) é maior e a logística de canteiro de obras é mais complexa.

O uso de painéis e lajes alveolares é vantajoso uma vez que dispensam escoramento e fôrmas na construção, economizam tempo, mão-de-obra e material. São compatíveis com estruturas de concreto convencionais ou metálicas, pré-fabricados ou alvenaria.

Além de conferir maior agilidade aos processos construtivos, o uso de painéis alveolares de concreto armado permite explorar todas as vantagens e características inerentes ao sistema de pré-moldados. Os detalhes de montagem variam conforme as características geométricas dos elementos o que garante uma execução com o mínimo de improvisações no local.

A especificação de lajes e painéis alveolares gera redução de custos por eliminar desperdícios, reduzir a complexidade e o peso próprio da estrutura, diminuir o contingente de mão de obra, otimizando o retorno sobre o capital investido e minimizando custos indiretos. A redução de materiais e mão-de-obra para a execução e, principalmente, a redução acentuada dos prazos de execução torna a adoção de lajes e painéis alveolares uma solução atraente para obras com canteiros pequenos e prazos limitados.

A laje alveolar autoportante não utiliza escoramentos em sua montagem. Mesmo quando é necessária a utilização de capa de concreto, os painéis alveolares são capazes de resistir a estes carregamentos sem necessidade de qualquer escoramento.

Quando se analisa a logística de canteiro de obras, os sistemas de lajes tradicionais exigem o recebimento, transporte e estocagem de diversos componentes da laje (vigotas, elementos de enchimento, armaduras e escoras). Para cada um dos componentes é necessário espaço para estocagem e traslado do material do recebimento ao estoque e do estoque ao local de utilização. Com relação às lajes alveolares, somente os painéis e eventualmente o aço para a malha de distribuição, deverão ser recebidos e descarregados, simplificando o recebimento, estoque e manuseio do produto.

O processo de montagem da laje alveolar proporciona rendimento médio de 50m²/h com uma equipe composta de três operários, o que equivale a 400m² em 8 horas de trabalho. Concluída a montagem dos painéis alveolares, é possível o início imediato do preenchimento das juntas ou execução de capa de concreto (se for o caso), sem necessidade de qualquer escoramento dos painéis.

Analogamente, os processos convencionais de alvenarias de fechamento ou mesmo estruturais exige um grande espaço de canteiro de obras para o recebimento, estocagem, transporte, manuseio e beneficiamento de matérias-primas, por exemplo: tijolos ou blocos, materiais a granel (areia, pedrisco, brita), cimento, cal (ou argamassa industrializada), aço etc. Os painéis alveolares autoportantes ou de fechamento reduzem drasticamente essa dinâmica, permitindo uma racionalização do canteiro de obras e o uso mais efetivo da mão-de-obra alocada para a execução do empreendimento.

Conforme Melo (2004) e Migliore (2008), a estocagem de painéis alveolares deve ser realizada de maneira que as placas sejam posicionadas na posição horizontal e utilizando-se calços de madeira entre as placas a uma distância mínima de 30 centímetros de cada extremidade da peça pré-moldada. A movimentação das lajes pré-fabricadas pode ocorrer por diversos dispositivos de içamento com auxílio de fita, cabos de aço, alças ou garras metálicas.

1) Estocagem de painéis alveolares

2) Movimentação com fita

3) Movimentação com garra metálica e perfil I

4) Movimentação por cabos de aço (ao lado)

5) Montagem de laje alveolar (abaixo)

Figura 2.10 - Estocagem e movimentação de painéis de lajes alveolares - sequência de 1 a 5. Fontes: <http://www.tatu.com.br/>; <http://www.r4tecno.com.br/>; Migliore (2008)

Painéis de parede podem ser estocados na posição vertical, desde que a borda inferior esteja devidamente protegida e calçada, conforme ilustrado posteriormente. O transporte das peças é realizado com caminhão munk.

O preenchimento das juntas entre os painéis tem como objetivo a garantia de um funcionamento solidário das diversas placas de modo a estabelecer uma colaboração entre elas e uma adequada distribuição de esforços, além de fornecer o acabamento e a estanqueidade necessária.

As opções disponíveis no mercado apresentam as seguintes soluções de tratamento de juntas:

1. O painel alveolar utilizado em lajes possui um chanfro entre as peças para acabamento da face inferior e as faces superiores das placas ficam afastadas entre si,

permitindo a passagem do concreto. Uma vez concretada, essa junta entre as placas constitui uma chave de cisalhamento que solidariza o conjunto das placas;

2. Normalmente em lajes de piso é recomendada a utilização da capa de concreto (capa de compressão) para o nivelamento da superfície da laje e correção da contra-flecha decorrente da protensão dos painéis alveolares, resultando em seção composta. A capa também permite o alojamento de armaduras necessárias à redistribuição de cargas concentradas, como é o caso das paredes apoiadas sobre a laje. Segundo especificações de fabricantes, esta armadura é constituída por fios (CA60) ou barras (CA50) com área de aço mínima de $0,60\text{cm}^2/\text{m}$ e contendo pelo menos 3 barras (ou fios) por metro;

3. Quando utilizado em painéis de fechamento, o acabamento das bordas configura um encaixe do tipo “macho-fêmea”, sendo que a junta aparente normalmente é tratada com argamassa flexível ou selante. Os painéis podem ser utilizados em posição vertical ou horizontal e são fixados na superestrutura por meio de chumbadores, grampos, cantoneiras, consolos e/ou outros dispositivos metálicos ou de concreto armado.

A Figura 2.11 ilustra os tratamentos de juntas descritos:

- 1) Detalhe de painel alveolar solidarizado por chave de cisalhamento. Fonte: <http://www.tatu.com.br/>

2) Detalhe de painéis solidarizados com capa de compressão. Fonte: <http://www.tatu.com.br/>

3) Detalhe de juntas e fixação à superestrutura em painéis alveolares de fechamento (ao lado, acima e abaixo)

Fonte: www.dmconstrutora.com.br

Figura 2.11 - Tratamentos de juntas entre painéis alveolares, seqüência de 1 a 3

Em relação ao tipo de ligação entre painéis de lajes ou de fechamentos e a superestrutura, a NBR 9062 (2006) classifica as ligações de elementos pré-fabricados de acordo com o tipo de esforço solicitante predominante, ou seja, por compressão, tração, flexão ou por cisalhamento. A seguir são descritos alguns tipos de ligações, segundo Silva (2003):

a) Quanto ao grau de restrição

- Ligações rígidas: capazes de transmitir “perfeitamente” todos os esforços, ou seja, para o nível de solicitação não ocorrem rotações relativas entre os elementos conectados;
- Ligações semi-rígidas: ligações capazes de transmitir parcialmente os momentos entre os elementos;
- Ligações articuladas: que se deformam irrestritamente sem transferência de momento entre os elementos.

b) Quanto ao tipo de contato

- Ligações macias: que utilizam materiais de amortecimento tais como: neoprene, chumbo, etc. Este tipo de ligação produz melhor distribuição de tensões de contato entre os elementos, além de permitir deslocamentos;

- Ligações duras: são as ligações que se fazem com o contato direto dos elementos ligados, ou assentamento direto sobre camada fina de argamassa úmida.

c) Quanto ao material empregado

- Junta de argamassa de assentamento: utiliza concreto ou argamassa que pode ser aplicada tanto na ligação de elementos pré-fabricados, como entre elemento moldado no local e elemento pré-fabricado;

- Junta a seco: especialmente para extremidades dos módulos-viga, essas juntas são realizadas com a utilização de aparelhos de apoio típicos, almofadas de neoprene, de chumbo ou apenas rótulas metálicas, tal como em estruturas de aço.

Krüger et al. (2002) define como conexões os elementos de fixação do painel à estrutura. Tais elementos são produzidos em aço inoxidável ou outro material encapsulado em concreto devidamente protegidos contra agentes corrosivos, principalmente a umidade. Em relação ao projeto, os autores recomendam:

- posicionar as conexões de modo a permitir a sua manutenção;
- projetar um número mínimo possível de conexões;
- prever zonas de amortecimento, juntas de controle, movimentação e dilatação;
- prever o fácil acesso aos equipamentos de içamento (guinchos, guindastes);
- evitar que o posicionamento de conexões acarrete em esforços de flexão e torção;
- utilizar preferencialmente conexões parafusadas ao invés de soldadas.

Dentre as opções de mercado, os painéis alveolares PCAA da empresa Alto Nível possuem um sistema diferenciado de solidarização das juntas entre os painéis. As fôrmas metálicas de bordo são soldadas umas às outras, garantindo a estabilidade do conjunto por intertravamento das peças e configurando um sistema autoportante.

Uma deficiência deste sistema, no entanto, é que necessariamente os painéis devem receber um revestimento externo quer seja de argamassa de reboco ou aplicação de textura acrílica para impedir a corrosão dos perfis metálicos. Percebe-se que a utilização em áreas molhadas também precede de impermeabilização adequada. A Figura 2.12 ilustra o processo de solidarização dos PCAA.

1) Posicionamento inicial e escoramento dos PCAA

2) Aplicação de solda nas junções entre os painéis

3) Aspecto geral de edifício de pavimentos construído em sistema de PCAA (parede portante e laje). Verifica-se a necessidade de revestimento de proteção à corrosão da fôrma metálica de bordo incorporada

Figura 2.12 - Tratamento de junta e ligação entre PCAA

A estabilidade horizontal de uma estrutura com paredes pré-moldadas é garantida pela ação de contraventamento por cisalhamento entre as paredes e pela ação de diafragma das lajes de pisos. As paredes de painéis pré-moldados são apropriadas para atuarem como paredes de enrijecimento. Contudo, elas só apresentam resistência no seu próprio plano, devendo ser complementadas com outras paredes perpendiculares aos seus planos ou com núcleos rígidos. (HANAI 2005)

Em termos de segurança e resistência ao fogo, geralmente, esse material alcança excelentes resultados quando submetido a altas temperaturas, resistindo de meia a duas horas

de um incêndio. Além disso, apresenta bom desempenho termo-acústico sendo possível melhorar tal característica com a incorporação de material isolante no interior dos alvéolos, como por exemplo: espuma ou isopor.

Oliveira (2002) demonstrou algumas características do painel alveolar em comparação com outros tipos de painéis pré-fabricados.

Tabela 2.6 - Valores do coeficiente de transmissão térmica de painéis pré-fabricados de concreto. Fonte: Oliveira (2002)

Descrição	Espessura	(K) (Watt/m ² °C)
Painel maciço de concreto comum ^[1]	150	3,84
	200	3,46
Painel maciço de concreto com argila expandida	150	2,85
	200	2,44
Painel alveolar	150	0,25
Painel sanduíche com duas camadas de concreto e uma de material isolante tipo poliestireno expandido	200	0,28

2.5.4. Tendências e inovações na tecnologia de pré-fabricados e sua aplicação ao painel alveolar

El Debs (2000) e Silva (2003), apontam que as inovações introduzidas na tecnologia de pré-fabricados de concreto se manifestam em três vertentes:

1. Produção

A produção de pré-moldados sempre foi vinculada à produção em série e, portanto, a automatização da produção dos elementos é sempre almejada, ocasionando constante necessidade de se investir no desenvolvimento de novos equipamentos.

Considerando o déficit habitacional brasileiro, a apropriação da tecnologia de pré-moldados é de fundamental importância para que se cumpram as metas de produção de habitações de interesse social. Dessa forma, é necessário investigar novos processos de produção (industriais ou artesanais) visando a produção de componentes e edifícios que se beneficiem das características intrínsecas da pré-fabricação.

A produção de pré-moldados vem ao encontro com as premissas da sustentabilidade aplicada à construção civil, pois permite maior controle em todo o processo.

2. Materiais

A durabilidade das estruturas está diretamente relacionada com a evolução e aplicação de novas técnicas e materiais. Assim esta propriedade se tornou um aspecto relevante e objeto de pesquisas que se desenvolvem atualmente, tendência que se manifesta no:

- desenvolvimento de concretos de alto desempenho;
- design de componentes;
- utilização de armaduras não metálicas;
- incorporação de adições (minerais) aditivos (química) e resíduos em matrizes poliméricas e cimentícias

3. Projetos

Cada vez mais se tem buscado a automatização de projetos de forma que se possam proporcionar soluções personalizadas através da aplicação do conceito de flexibilidade. A tecnologia de pré-fabricados começa a ganhar espaço nos escritórios de arquitetura e nos projetos de edifícios comerciais - Oliveira (2002) ressalta o uso de elementos de concreto pré-fabricado arquitetônico – e de habitações de interesse social, haja visto a participação de entidades como a ABCP (2002) e Comunidade da Construção (2008) em parceria com o poder público para divulgar iniciativas e experiências com este foco.

No que se refere ao painel alveolar, é fundamental para justificar a realização deste estudo que, apesar das qualidades citadas a respeito desta tecnologia, o estado da técnica aponta as seguintes deficiências:

a) Apesar de caracterizar um componente com potencial elevado de utilização em construções de tipologia residencial, o alto custo e conseqüente elevado grau de industrialização do processo produtivo de painéis alveolares inviabiliza a utilização e diversificação da produção em larga escala para essa demanda.

Tal fato é especialmente correlato com a utilização de concreto de baixa relação água/cimento e processo de moldagem por extrusão em pistas de concretagem.

Verificaremos que com a adoção da incorporação de fôrma interna, a qual se supõe de material leve, composta por materiais locais ou advindos da reciclagem de rejeitos agroindustriais e facilmente manuseável, poder-se-á utilizar concreto adensável e o local de concretagem poderá ser adaptado para a demanda característica de cada empreendimento. Dessa maneira, pequenas usinas de pré-moldados poderão ser instaladas em canteiros de obras e suas instalações movidas para outras localidades.

b) Os processos produtivos deste componente possuem pouca conectividade com outros subsistemas, especialmente o de instalações prediais elétricas e hidráulicas - sanitárias, sendo que na maioria dos casos, as instalações são externas aos painéis

Observaremos que pelo fato de haver a possibilidade de pré-fabricação de paredes alveolares por associação de placas modulares, bem como a adoção de fôrma interna complementar sobreposta, fica patente a plena conectividade com os demais sistemas prediais, pois possibilita a fabricação de paredes completamente funcionais ou módulos que permitem arranjo e conexão entre si.

c) O tratamento de juntas entre os painéis existentes é dificultada pela falta de interação e solidarização estrutural dos mesmos. Há a necessidade de executar estruturas (pilares e vigas) em complemento do sistema construtivo. Dessa forma, os painéis, apesar de elevadas resistências mecânicas, normalmente são utilizados em sistema de fechamento.

Nesta questão, a solução aqui formatada se apresenta na amarração entre os painéis por meio do grauteamento do alvéolo formado pelas extremidades dos painéis promovendo a perfeita solidarização entre os elementos pré-moldados e conferindo à estrutura características monolíticas. Essa característica pode dispensar o uso de estruturas de pilares e vigas. Sobre esta questão é importante relevar que quando os painéis se configuram em elementos autoportantes, portanto exercendo a dupla função de estrutura e fechamento, este fato determina uma drástica redução de custos do empreendimento.

É importante salientar que os métodos tradicionais de juntas e ligações praticados em sistemas de painéis pré-fabricados é perfeitamente adaptável para o painel desenvolvido neste trabalho.

d) No processo produtivo as peças são moldadas em pistas de concretagem com comprimentos geralmente superiores a 100,00m e depois cortadas nos comprimentos desejados pelo cliente. Tal processo depende de equipamentos de corte com discos diamantados de elevada rotação, o que acarreta uma alta geração de resíduos (lama proveniente do corte via úmida), elevado consumo energético (equipamentos de corte) e de custos operacionais.

Neste trabalho, propõe-se que o comprimento do painel alveolar será determinado pela fôrma. Dessa maneira, as fôrmas poderão ser racionalizadas e padronizadas para as diversas utilizações, conforme o projeto de produção do edifício, possibilitando a modulação de vãos e conseqüentemente eliminando a fase de corte no processo produtivo. Essa inovação aproxima o processo produtivo do painel do conceito já consolidado em blocos cerâmicos ou de concreto para alvenaria estrutural, por exemplo.

Por conta da flexibilidade de dimensões que podem ser obtidas, este novo método de produção de painel alveolar contribui para a otimização da modulação, redução de problemas de interface entre componentes e subsistemas, padronização de detalhes e precisão, racionalização e simplificação na execução da obra nos diversos níveis de montagem (painel modular, painel de parede e ou estruturas moldadas in loco), minimização de desperdício, maior produtividade, redução de prazos, capacitação de mão-de-obra com visão sistêmica da execução do edifício.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são expostos os materiais e métodos utilizados na produção e avaliação de desempenho mecânico do painel alveolar. São apresentadas as caracterizações de insumos da matriz cimentícia, dos aditivos e da armadura de fibra de vidro, bem como relatadas as etapas e procedimentos de produção do painel e o método de ensaio de compressão.

A pesquisa se realizou em duas etapas: a primeira diz respeito ao referencial teórico, com o objetivo de subsidiar informações sobre o tema, correlacionando-o quanto às questões de estratégias de modernização ligadas ao setor da construção civil, o desenvolvimento de novos materiais, componentes, sistemas e processos de produção de edifícios e a apropriação de tecnologias para o desenvolvimento sustentável.

Foram consultadas normas técnicas internacionais e nacionais, catálogos de fabricantes, artigos técnicos e científicos, sites da internet e publicações sobre o tema.

A segunda etapa consistiu da produção e ensaio do painel alveolar de concreto armado observando-se as seguintes fases:

- a) Caracterização de agregados, cimento e aditivos que irão compor a matriz de cimento Portland;
- b) Caracterização das fibras e resinas que irão compor a fôrma interna (núcleo alveolar);
- c) Caracterização da armadura não metálica de fibra de vidro impregnada;
- d) Ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto;
- e) Ensaio de resistência à compressão dos painéis alveolares produzidos.

3.1. CIMENTO PORTLAND

Para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e dos painéis modulares utilizou-se o cimento CP V ARI Plus, freqüentemente utilizado para fabricação de pré-moldados, fato que se justifica pela rapidez de ganho de resistência, o que permite uma desmoldagem rápida das peças produzidas.

A Tabela 3.1 indica os resultados das análises do cimento Portland utilizado, segundo informações do fabricante:

Tabela 3.1 - Caracterização do cimento Portland utilizado

Composição química do cimento	CP V ARI PLUS *
Proporções (%/m. de cimento)	
Clínquer	90,33
Escória	-
Sulfato de Cálcio	4,45
Filer Calcário	5,08
Finura Blaine (cm²/g) NBR 7224	4.650
Composição Potencial (%)	
C ₃ S	58,95
C ₂ S	10,15
C ₃ A	7,36
C ₄ AF	9,5
Outros Constituintes	14,08
Tempo de pega da pasta de cimento – NBR 11581 – MB 3434	
Temperatura (°C)	25
Rel. a/c (MB 3433)	0,29
Início de pega (min)	143
Fim de pega (min)	206
# 200 (%)	0,15
# 325 (%)	2,55
Massa específica (g/cm³) NBR 6474	3,1
Resistência à compressão	
Idade (dias)	MPa
1	28,8
3	43,1
7	47,9
28	57,3
* Fonte: Grupo Holcim Brasil S.A.	

É importante ressaltar que num processo de produção consolidado é possível a utilização de outros tipos de cimento, inclusive aqueles com menor teor de clínquer e que se configuram em alternativa mais sustentável ambientalmente, como por exemplo cimentos do tipo CP III 40, ou ainda, compósitos constituídos de adições pozolânicas e/ou agregados alternativos. A adoção do cimento de alta resistência inicial para os testes de laboratório foi pautada pela agilidade na realização das moldagens dos painéis e dos ensaios.

A caracterização do cimento exigiu consulta às seguintes normas técnicas: NBR 5738 (ABNT, 1994b) e NBR 7215 (ABNT, 1991).

3.2. AGREGADOS

3.2.1. Agregado miúdo

A areia selecionada para este trabalho é facilmente adquirida na região de São Carlos, sendo extraída do Rio Mogi. As propriedades determinadas em laboratório referentes estão dispostas nas Tabelas 3.2 e 3.3 e na Figura 3.1 estão relacionadas as composições granulométricas.

Tabela 3.2 - Ensaios realizados para caracterização do agregado miúdo.

Ensaio	Norma	Caracterização
Composição granulométrica	ABNT NBR 7217	Areia Média – Ver Tabela 3.3 e Figura 3.1
Massa unitária	ABNT NBR 7251	1,42 g/cm ³
Massa específica	ABNT NBR 9776	2,60 g/cm ³
Teor de materiais pulverulentos	ABNT NBR 7219	0,58%
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	ABNT NBR 7218	1,35%
Impurezas orgânicas	ABNT NM49	*
Número de Angulosidade (NA)	BS 812 Parte 1 (1975)	5,6

Tabela 3.3 - Composição Granulométrica Areia

Peneira # (mm)	Massa retida (g)		Médias	
	Massa Retida	% Retida	% Retida	% Retida Acumulada
9.5	0,0	0,0%	0%	0%
6.3	0,6	0,1%	0%	0%
4.75	0,6	0,1%	0%	0%
2.36	12,1	2,4%	1%	1%
1.18	50,6	10,1%	5%	6%
0.6	165,3	33,1%	17%	23%
0.3	203,4	40,8%	30%	54%
0.15	63,8	12,8%	43%	96%
Fundo	2,6	0,5%	4%	100%
Soma	499,0	100,0%	100%	100%
Diâmetro máximo característico:			2.36mm	
Módulo de finura:			1,81

(1)

(2)

Figura 3.1 - Zona Utilizável (1) e Zona Ótima (2), Limites Inferiores e Superiores, areia do Rio Mogi.

3.2.2. Agregado graúdo:

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa – pedrisco de basalto britado extraído na região de São Carlos – apresenta as seguintes características.

Tabela 3.4 - Ensaios realizados para caracterização do agregado miúdo.

Ensaio	Norma	Caracterização
Composição granulométrica	ABNT NBR 7217	Ver Tabela 3.5 e Figura 3.2
Massa unitária estado solto	ABNT NBR 7251	1,43 g/cm ³
Massa unitária estado compactado	ABNT NBR 7810	1,52 g/cm ³
Massa específica	ABNT NBR 9776	2,87 g/cm ³
Teor de materiais pulverulentos	ABNT NBR7219	2%

Tabela 3.5 - Composição Granulométrica Pedrisco

Peneira # (mm)	Massa retida (g)		Médias	
	Massa Retida	% Retida	% Retida	% Retida Acumulada
12,5	5,3	0,1%	0%	0%
9.5	44,7	0,9%	1%	1%
6.3	1418,1	29,5%	30%	31%
4.8	1250,9	26,1%	26%	57%
2.4	1390,5	29,0%	29%	86%
1.2	345,1	7,2%	7%	93%
0.6	150,0	3,1%	3%	96%
0.3	100,6	2,1%	2%	98%
0.15	54,8	1,1%	1%	99%
Fundo	40,0	0,8%	1%	100%
Soma	4800,0	100,0%	100%	100%
Diâmetro máximo característico:				9,5mm
Módulo de finura:				5,29

Figura 3.2 - Distribuição do diâmetro das partículas, pedrisco de basalto britado.

3.3. MICROCONCRETO

A definição do traço adequado ao concreto utilizado teve como requisitos a característica geométrica da seção, conformada pelos alvéolos e o processo de produção do painel, objetivando o lançamento e adensamento do concreto diretamente sobre o molde em posição horizontal, o que deveria permitir o completo preenchimento da seção. Ressalta-se que a composição granulométrica do compósito é fundamental para o bom preenchimento do molde, assim sendo optou-se pelo microconcreto, utilizando-se agregados com dimensão máxima de 9,5mm.

Foram estudadas características de traços de microconcreto usualmente utilizados na confecção de pré-moldados e reparos estruturais.

Outros fatores relevantes para a definição do traço foram a resistência à compressão característica e o módulo de elasticidade, resultados de análises do provável comportamento mecânico do painel submetido ao ensaio de compressão, considerando os equipamentos disponíveis para a realização do mesmo.

Os sistemas estruturais quando estão submetidos a carregamentos, podem romper de várias formas dependendo do material usado, do tipo de estrutura, das condições de apoio, entre outras considerações. Assim sendo, o projeto de um elemento, deve satisfazer requisitos específicos de tensão, deflexão e estabilidade. As dimensões do painel produzido o caracterizam como um elemento estrutural esbelto. Tal elemento, quando sujeito a uma força axial de compressão tende a sofrer deflexão lateral que é chamada de flambagem. Em geral a flambagem leva a uma ruptura repentina da estrutura.

Isto posto, os modelos teóricos do comportamento mecânico do painel produzido com microconcreto convencional em conformidade com as recomendações da NBR 14861 (ABNT, 2002) (com resistência à compressão característica de 25MPa e Módulo de Elasticidade na faixa de 25 GPa) resultaria na aplicação de cargas de aproximadamente 90ton, aplicando-se o conceito de carga crítica de flambagem obtido por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1)$$

Onde:

P_{cr} - Carga crítica ou carga axial máxima na peça imediatamente antes da flambagem.

E – módulo de elasticidade do material

I – O menor momento de inércia da área da seção transversal.

L - Comprimento da coluna sem apoio.

Em projeto se utiliza a eq. (1) em função do raio de giração, onde o momento de inércia é:

$$I = Ar^2 \quad (2)$$

Onde A e a área da seção transversal e r o raio de giração da área da seção transversal.

Dessa forma tem-se:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E (Ar^2)}{L^2} \Rightarrow \left(\frac{P_{cr}}{A} \right) = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (3)$$

Dessa forma, a tensão crítica é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (4)$$

Onde

σ_{cr} - Tensão crítica que é a tensão média na coluna imediatamente antes de a coluna flambar;

E - módulo de elasticidade do material

L - comprimento da coluna sem apoio, cujas extremidades são presas por pinos

R - o menor raio de giração da coluna, determinado por $r = \sqrt{I/A}$, onde I é o menor momento de inércia da área da seção transversal A da coluna.

A forma fletida correspondente é definida pela equação.

$$v = C_1 \sin \frac{\pi x}{L} \quad (5)$$

Aqui a constante C_1 representa a deflexão máxima, que ocorre no ponto médio da coluna. Valores para C_1 não podem ser obtidos, pois se desconhece a forma fletida exata da coluna. Por exemplo, se $n=2$ aparecerão duas ondas na forma flambada. Ilustra-se tais situações na Figura 3.3.

(a) Modo de flambagem para $n=1$ (b) Modo de flambagem para $n=2$

Figura 3.3 - Modo de flambagem de colunas submetidas à compressão axial

Nota-se que a carga crítica é proporcional apenas das dimensões da seção, do comprimento da coluna e do módulo de elasticidade do material que compõe o elemento estrutural.

Destaca-se que o painel sofrerá flambagem em torno do eixo principal da seção transversal de menor momento de inércia (o eixo mais fraco), por exemplo, a seção retangular representada na Figura 3.4 que sofre flambagem em torno do eixo $a-a$.

Figura 3.4 - Flambagem da coluna em torno do eixo com menor momento de inércia.

Considerando a geometria da seção, o cálculo de I deriva de uma composição entre a forma retangular e elíptica, conforme demonstra a Figura 3.5:

Figura 3.5 - Dimensões da seção transversal do painel desenvolvido

Assim, o Momento de Inércia da seção seria dado pela equação:

$$I_{\text{painel}} = (b \cdot h^3 / 12) - (\pi \cdot a \cdot b^3 / 4) \cdot 5^* \quad * \text{pois são 5 elipses na seção.}$$

As considerações sobre o comportamento mecânico do painel são baseadas em BEER e JOHNSTON (1995) e HIBBELER (2000).

Uma vez que I e L^2 são constantes, variando-se o módulo de elasticidade teríamos o seguinte modelo teórico demonstrado na Figura 3.6:

Figura 3.6 - Comportamento mecânico teórico do painel submetido à compressão axial. Relação entre carga crítica de flambagem e Módulo de Elasticidade

Percebe-se que para módulos de elasticidade característicos dos concretos convencionais ($20\text{GPa} < E < 27\text{GPa}$), a carga crítica de flambagem estaria em valores compreendidos entre 94ton a 127ton.

Diante das questões relatadas, e das condições do pórtico disponível para o ensaio no LCC, definiu-se que o microconcreto ideal para o protótipo produzido em laboratório e visando a consecução de resultados experimentais deveria ter as seguintes propriedades:

Tabela 3.6 - Propriedades desejáveis do microconcreto em função da geometria da seção do painel e condições de ensaio.

Abatimento (ANBT NBR 7215 e NM 67)	$>240\text{mm}$
Módulo de Elasticidade (ABNT NBR 8522)	$\leq 18\text{ GPa}$
Resistência à compressão característica f_{ck28} (ABNT NBR 5739)	$\leq 15\text{MPa}$

A determinação do traço de concreto seguiu os procedimentos descritos em Helene e Terzian (1992). O teor de argamassa foi determinado de forma que o concreto fosse trabalhável, coeso, sem ocorrência de exsudação e com bom acabamento superficial.

O traço 1:m representa a proporção aglomerante:agregado que compõe a mistura, a letra m representa o total de agregados. No caso em questão 1:5, sendo 3 partes de areia e 2 partes de pedrisco.

Para melhorar a trabalhabilidade e ao mesmo tempo influenciar o módulo de elasticidade do composto, foi utilizado aditivo incorporador de ar Vedalit da Otto Baumgarten. Tal aditivo é composto de resinas naturais, com densidade $1,01\text{g/cm}^3$ e é comumente utilizado em argamassas de reboco, ou seja, revestimentos de pequena espessura, proporcionando um bom acabamento superficial, aderência, coesão das partículas, impermeabilidade e menor fissuração e exsudação.

O traço definitivo do microconcreto foi: 1:3:2 (cimento:areia:pedrisco) relação água/cimento - $a/c = 0,72$ e adição de 0,2% Vedalit (em relação à massa de cimento).

Para as análises de resistência do microconcreto foram selecionados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, preparados de acordo com a NBR 5738 (1994). Após a moldagem, os corpos-de-prova, ainda nos moldes, recebiam um filme plástico para evitar a perda de umidade, permanecendo durante 24 horas, para cura inicial ao ar. Terminado o tempo inicial de cura, os mesmos são retirados dos moldes, identificados e armazenados em câmara úmida onde foram mantidos até as datas de ensaio.

Foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples, determinada segundo as recomendações da NBR 5739 (1994), e de módulo de elasticidade, determinado seguindo recomendações da NBR 8522 (2003), traçando-se, portanto a relação entre as tensões e as deformações das amostras.

3.4. ARMADURA DE FIBRA DE VIDRO

A conformação dos alvéolos e a espessura do painel (8cm), resultou em uma camada fina de cobrimento da armadura. Peruzzi (2007) ressalta que as armaduras não metálicas são recomendáveis para reforço de elementos estruturais esbeltos

Verifica-se que vários estudos relacionam que as patologias de elementos esbeltos de argamassa armada à corrosão precoce da armadura decorrente da pequena espessura da camada de cobrimento.

Tavares (2006) afirma que o avanço dos estudos relacionados às armaduras não-metálicas, possibilita o uso de elementos estruturais esbeltos mesmo em ambientes considerados agressivos.

Peruzzi (2007) relata que os fatores relevantes para especificar o tipo de fibra a ser utilizado são: resistência mecânica, módulo de elasticidade e custo. Algumas características da fibra de vidro são demonstradas abaixo:

Tabela 3.7 - Propriedades de fibras de vidro utilizadas em compósitos de cimento Portland. Fonte: Peruzzi (2007)

Tipo	Diâmetro (μm)	Massa Específica (g/cm^3)	Resist. Tração (MPa)	Módulo Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Durabilidade em meio alcalino do cimento Portland
Vidro E*	9 a 15	2,5 a 2,65	2100 a 3800	77	2 a 4,5	Pouca
Vidro AR**	10 a 20	2,5 a 2,8	2000 a 3500	70 a 84	2 a 5	Razoável
* convencionais; ** resistente à álcalis						

Neste trabalho foram utilizadas barras de fibras de vidro impregnadas, conhecidas por *rebars* produzidas pelo processo chamado pultrusão que basicamente significa tracionar as

fibras produzidas em fios contínuos, impregnando-as com resina. O processo é ilustrado na Figura abaixo:

Figura 3.7 - Esquema de produção de *rebars* de fibra de vidro pelo processo de pultrusão. Fonte: Peruzzi (2007)

O *rebar* tem sido usado com sucesso em muitas aplicações industriais e mais recentemente como reforço para o concreto em tabuleiros de pontes, configurando potencial benefício quanto ao aumento da vida útil da estrutura.

No Brasil, o *rebar* para uso na construção civil ainda está em desenvolvimento, visando a adequação ao uso como reforço do concreto ou argamassas. Peruzzi (2007) destaca que ainda é necessária a importação deste material dos Estados Unidos, Canadá e Chile, pois estes países detêm a tecnologia de tratamento superficial para proporcionar nervuras nas barras e aderência com a matriz de cimento Portland. A Figura 3.8 demonstra alguns *rebars* disponíveis no mercado.

Figura 3.8 - A) *rebar* de origem chilena; B) *rebar* americana contendo roving em hélice e tratamento superficial de camada de areia e resina; C) *rebar* lisa, produzida no Brasil pela empresa Tecnum sediada em São Carlos e que foi utilizada neste trabalho. Fonte: Peruzzi (2007)

A utilização de *rebars* em painéis de concreto autoportantes é inédita e contribui para a produção de um componente de maior leveza e durabilidade, impactando na vida útil do mesmo, uma vez que a pequena espessura de cobrimento da armadura pode acarretar em corrosão às armaduras de aço.

Justifica-se a incorporação do *rebar* pelas considerações de Peruzzi (2007) onde se analisa a contribuição das armaduras não metálicas em elementos construtivos de pequena espessura, destacando-se as placas cimentícias para piso elevado e argamassa armada.

Além disso, uma vez definido que o traço do microconcreto utilizado para a produção dos painéis deve ser de fácil controle tecnológico, principalmente quando se pauta na questão da apropriação da tecnologia em processos de autogestão, a utilização de microconcretos de alto desempenho é dificultada. Assim sendo a incorporação de materiais de reforço não susceptíveis à corrosão se configura em uma solução viável.

A resistência a tração direta do *rebar* foi obtida por ensaios no LCC, adaptando-se procedimentos descritos na Norma ASTM 6637 e método exposto por Peruzzi (2007). Basicamente, tal procedimento consiste em tracionar a barra até a ruptura, aferindo-se a resistência.

Diante da ausência de tratamento superficial do *rebar*, houve a necessidade de adaptar um dispositivo acoplado à barra que pudesse transmitir de maneira eficiente os esforços ao longo da seção tracionada.

A primeira tentativa foi de colar segmentos de tubos metálicos nas extremidades. No entanto, durante o ensaio, os tubos escorregavam. Num segundo momento, aplicou-se uma camada de resina poliuretana nas extremidades, aumentando a aderência superficial da barra, método que conferiu melhor resultado que o anterior, porém foi observado que ocorreu um esmagamento da seção do *rebar* junto ao dispositivo de tração (garra metálica).

Diante dos fatos, um terceiro método foi aplicado, envolvendo as extremidades do *rebar* num prisma de resina, configurando maior área de contato com o dispositivo de tração. Este método apontou os melhores resultados, permitindo deduzir que houve uma transferência mais efetiva dos esforços ao longo da barra.

Os procedimentos de preparação das amostras, dispositivos e a sequência de ensaios é ilustrada na Figura 3.9:

1) Método 1: tubos metálicos acoplados nas extremidades do *rebar*

2) Método 1: visão geral e detalhe do dispositivo de tração

3) Método 2: tratamento superficial das extremidades com resina

4) Método 3: prisma de resina envolvendo as extremidades do *rebar* (acima). Condição do ensaio (ao lado)

Figura 3.9 - Métodos de ensaio de resistência à tração do *rebar* – preparação das amostras e condição do dispositivo de tração – sequência de 1 a 4

Foram ensaiadas 6 amostras obtendo-se a Resistência à tração (f_t) média de 650 MPa (Fonte: Certificado LCC 100/2008).

3.5. MÉTODO DE PRODUÇÃO DO PAINEL ALVEOLAR

Os trabalhos experimentais prosseguiram com o desenvolvimento de um núcleo pré-fabricado, com uma conformação especialmente idealizada para otimizar a relação vazio/cheio da seção transversal do painel. Alguns estudos preliminares de seções são demonstrados no Apêndice A.

No modelo em desenvolvimento foi adaptada uma fôrma metálica utilizando chapa comumente utilizada para a fabricação de portões, para moldagem do núcleo em fibra de vidro. Com o intuito de uma melhor conectividade com os sistemas de instalações prediais, desenvolveu-se uma fôrma sobreposta à de sentido longitudinal, permitindo o desenvolvimento de tubulações em duas direções: prumadas verticais e ramais horizontais. A Figura 3.10 a seguir ilustra o desenvolvimento do modelo adotado.

Figura 3.10 - Fôrma metálica para moldagem do núcleo, em fibra de vidro.

Para a fabricação do modelo experimental do núcleo alveolar utilizou-se de manta de fibra de vidro, usualmente aplicada em reforço/restauração automotiva, da Maxi-Rubber

Código do produto: MP – 021, cuja caracterização segundo o fabricante é demonstrada na Tabela 3.8:

Tabela 3.8 - Propriedades da manta de fibra de vidro	
Caracterização	
Principais Componentes:	Fibra de vidro CAS nº 65997-17-3 Aglutinante que contém: 2 ácido butadienóico (E), Polímero com 1,2 etanediol e a, a – [(1 – metiletilideno) di – 4, 1-fenileno] bis {,w, - hidropoli [oxi (metil – 1,2 – etanedil)]} Nome comum: Resina de Poliéster Sólida não Saturada CAS nº 39382-21-3
Propriedades Físico-Químicas	
Estado físico:	sólido
Cor:	branca
Ph:	neutro
Temperaturas específicas ou faixas de temperatura nas quais ocorrem mudanças de estado físico	Ponto de fusão: > 871°C Ponto de Amolecimento: Aprox. 843°C
Gravidade Específica (H2O = 1):	Vidro = 2,6
Solubilidade (na água):	Pequena
* Fonte: Disponível em http://www.maxirubber.com.br/fispq/manta_fibra_de_vidro.pdf (acesso em 17/08/2009).	

O Processo de moldagem líquida do compósito de fibra de vidro requer a impregnação por uma resina polimérica. A impregnação de resinas apresenta muitas vantagens sobre outros processos de fabricação de compósitos, incluindo baixo custo de mão-de-obra, ferramental simples, ciclos de tempo satisfatórios e possibilidade de fabricação de estruturas complexas com qualidade.

No processo de moldagem do núcleo, uma resina líquida pré-catalisada é aplicada com trincha sobre o molde, impregnando a pré-forma fibrosa seca depositada no interior deste. Uma vez que o molde foi totalmente preenchido e a fibra saturada pela resina, esta é levada à cura e, então, o compósito moldado é retirado do molde.

A fabricação bem sucedida de um compósito neste caso é bastante dependente de um preenchimento completo do molde. A impregnação da resina é influenciada por diversos fatores tais como as propriedades químicas e reológicas da resina líquida, orientação ou anisotropia da pré-forma fibrosa, temperatura do molde, método de aplicação (manual ou injeção) e características superficiais entre a fibra e a resina.

Neste estudo, foi escolhida a resina poliéster isoftálica insaturada comercial tipo UCEFLEX UC ISO 1005 do fabricante Anjo. Trata-se de uma resina de média reatividade, não acelerada, de cura rápida e uniforme, com pequena contração durante a cura, teor de estireno máximo de 44%, com densidade entre 1,10 e 1,20 g/cm³ (25°C), viscosidade entre 400 e 600 CP e tempo de gel de 15 minutos. A razão estequiométrica de resina/catalisador utilizada para a reação de cura seguiu a indicação do fabricante.

A Figura 3.11 apresenta o método de moldagem do núcleo alveolar de fibra de vidro e a peça do núcleo sendo retirada do molde, após sua polimerização.

(1)

(2)

Figura 3.11 - Produção do molde – núcleo interno do painel alveolar. (1) colocação da manta de fibra de vidro sobre o molde metálico; (2) impregnação de resina poliéster; (3) e (4) Retirada da chapa de fibra de vidro (núcleo do painel alveolar) do molde.

Para que ocorra uma melhor interação entre as faces do painel, são executados furos nos vales que configuram os alvéolos em etapa posterior à moldagem do núcleo.

A partir da associação de dois ou mais segmentos do núcleo, pode-se obter a dimensão desejada da forma que irá constituir o alvéolo e conseqüentemente o painel. Estas dimensões devem ser determinadas em função da modulação mais adequada do projeto específico da edificação, visando viabilizar as operações de transporte e montagem dos elementos de painéis, sejam eles moldados “in loco” ou em pistas.

Neste trabalho, a altura adotada para o painel protótipo foi de 2,15m (dois metros e quinze centímetros), determinada pelas dimensões da chapa metálica para a moldagem e das condições do futuro ensaio do painel à compressão axial, em razão dos dispositivos que foram instalados para a construção do pórtico de reação, o que acarretava num limite de altura de 2,20m (dois metros e vinte centímetros) conforme demonstrado no ensaio de painel.

A Figura 3.12 ilustra a seqüência de união de dois segmentos, por meio de rebite e a justaposição das placas que formam o núcleo alveolar.

(1) Visão geral da montagem de uma das faces do núcleo alveolar. Observar detalhe da união dos segmentos da chapa de fibra de vidro com rebite.

(2) Face do núcleo alveolar. Observar a justaposição dos segmentos e os recortes nos vales que vão permitir a interação das duas faces da peça pré-moldada.

(3) Aspecto final de uma das faces do núcleo alveolar.

(4) Montagem do alvéolo, pela justaposição das faces por meio de rebites

(5) Aspecto do núcleo alveolar após a montagem. Verificou-se que o núcleo possui boa rigidez e leveza.

Figura 3.12 - Processo de montagem do núcleo alveolar por meio da união das chapas de fibra de vidro. Sequência 1 a 5.

Após a montagem do alvéolo, é promovida a colocação da tela de reforço, composta de *rebar* de fibra de vidro, unidas umas às outras por meio de adesivo CIANO CA-3.

Primeiramente as barras são cortadas conforme um gabarito determinado pela configuração dos alvéolos e dos vales interligados do núcleo. O espaçamento resultante configurou uma tela de proporções semelhantes à tela de aço eletrosoldada especificação M138 disponível no mercado nacional.

O adesivo CIANO CA-3 foi utilizado para a montagem da armadura não metálica de barras de fibra de vidro, configurando uma espécie de solda entre as barras longitudinais e transversais. Trata-se de adesivo instantâneo em base de cianoacrilato de etil, monocomponente de polimerização espontânea por ação da umidade ambiente, de fácil aplicação e secagem rápida, garantindo segurança no manuseio e estocagem das armaduras. A Tabela 3.9 indica as propriedades deste adesivo:

Tabela 3.9 - Propriedades do Adesivo CIANO CA3.

Propriedades Gerais Sem polimerizar	
Aspecto:	líquido de alta viscosidade, de forte odor característico
Cor:	Incolor a ligeiramente amarelado
Solubilidade:	metiletilcetona (MEK), acetona.
Densidade (+25°C) (MC-S-50.010):	1,04 a 1,06 g/cm ³
Viscosidade (+25°C):	80-120 mPa.s (Brookfield RVT, spindle 1, 20 RPM)
Folga máxima de aplicação:	0,10 mm
Velocidade de endurecimento (em segundos):	Aço: Máx. 12 (IRAM 45049) Nitrilo: Máx. 8 Acrílico: Máx. 10 Madeira (*): Máx. 20 (*Valores obtidos utilizando madeira macia, tipo pinho.
Toxicidade:	Xi –Irritante.
Propriedades Gerais polimerizado	
Aspecto:	sólido, matéria plástica rígida
Cor:	incolor
Temperatura de trabalho:	-50 a + 80°C (-65 a + 180°F)
Resistência à tração (ASTM-D-2095):	20-30 MPa sobre uniões aço sobre aço, endurecido a temperatura ambiente durante 24 horas.
Resistência química: % da resistência original depois de duas semanas de imersão a 20°C:	Querosene: 84% Etilenglicol: 72% Água (1): 56% HCl 10%: 60% (1) Com materiais flexíveis são observados valores mais elevados
* Fonte: ANAEROBICOS S.A. Grupo ITW. Disponível em http://www.anaerobicosbrasil.com.br (acesso em 07/05/2009).	

O adesivo foi aplicado diretamente sobre uma das superfícies (barras longitudinais), na quantidade mínima necessária para formar uma fina película e as armaduras transversais foram sobrepostas imediatamente, exercendo uma leve pressão.

O processo é finalizado pela amarração entre as armaduras das duas faces (por meio de arame recozido nº 18) e a colocação de espaçadores de PVC para garantir o cobrimento uniforme das duas faces do painel.

A etapa seguinte consiste em posicionar o núcleo armado na forma composta de madeirit resinado e sarrafo de pinus (com aplicação de desmoldante e devidamente reforçada para suportar o lançamento e adensamento do concreto utilizando-se vibrador).

Finalmente, o microconcreto é lançado no molde, devidamente vibrado para proporcionar o completo preenchimento do mesmo. A Figura 3.13 ilustra a montagem final do núcleo armado e a moldagem do painel.

(1) Amarração das duas armaduras com arame recozido.

(2) Detalhe da amarração. Notar que o gabarito da armadura coincide com os vazios de interligação entre as faces do painel.

(3) Aspecto geral do núcleo armado. Notar que a lateral foi vedada com fita e isopor para impedir a infiltração do microconcreto no momento do adensamento.

(4) Detalhe do posicionamento de espaçadores de PVC.

(5) Fôrma do painel.

(6) Posicionamento do núcleo armado na fôrma do painel.

(7) Lançamento do microconcreto.

(8) Adensamento do microconcreto com uso de vibrador.

(9) Acabamento superficial do painel.

Figura 3.13 - Procedimentos da montagem do núcleo armado e da concretagem do painel alveolar pré-moldado – sequência de 1 a 9.

3.6. MÉTODO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO DO PAINEL ALVEOLAR

Foram executados quatro painéis alveolares com dimensões de 55,5cm x 2,15m x 8,0cm (largura x altura x espessura) a fim de se analisar o comportamento do painel, submetendo a estrutura a uma prova de carga de compressão axial, cujas condições de ensaio foram adaptadas do método comumente utilizado para a avaliação de painéis de alvenaria – NBR 8949 (ABNT, 1985).

A tecnologia de Painéis alveolares é normalmente utilizada para a produção de lajes alveolares protendidas (PACPs), elementos pré-moldados comumente utilizados em tabuleiros de edifícios, sendo que os alvéolos em combinação com a protensão da armadura possibilitam cobrir grandes vãos. São especialmente projetados para resistir ao cisalhamento e ao momento fletor. (BROO; LUNDGREN E ENGSTRÖM, 2004).

O ensaio de compressão do painel não é comum na literatura e, tendo em vista que o objetivo deste trabalho é a apropriação desta tecnologia para a construção de habitações de interesse social, possibilitando que num único componente seja possível a execução de toda a superestrutura, fechamento e acabamento de painéis de paredes e lajes, julgou-se necessária a avaliação do painel como elemento de parede portante.

Os resultados obtidos indicaram parâmetros de resistência e deformação lateral (flambagem) dos painéis, possibilitando correlações com os resultados dos ensaios de corpos-de-provas cilíndricos e com o modelo teórico do painel submetido à compressão axial.

A execução desse ensaio exigiu consulta às seguintes normas e publicações de apoio: NBR 6118 (ABNT, 2004b) e NBR 14861 (ABNT, 2002), sendo que alguns parâmetros descritos nas referidas publicações foram desconsiderados em função das características do modelo de ensaio e condições do pórtico disponíveis no laboratório.

O ensaio consiste em construir um pórtico de reação para submeter o painel à compressão axial, imprimindo a carga através de um macaco hidráulico de capacidade suficiente para levar o elemento até a ruptura, contendo dispositivo de célula de carga acoplado devidamente ligado à leitor digital. A carga aplicada é distribuída à seção do painel por meio de um perfil “I” metálico. Para “capeamento” das extremidades foi utilizado neoprene.

Além da leitura de carga, foram posicionados dois defletômetros na porção central do painel com o intuito de aferir a deflexão lateral da peça, permitindo a correlação entre tensão e deformação.

A figura 3.14 demonstra o esquema do ensaio nos painéis.

(1) Vista geral do pórtico.

(2) Detalhe do posicionamento do defletômetro.

(3) Detalhe do dispositivo de aplicação de carga – macaco hidráulico, célula de carga, perfil de distribuição e neoprene (capeamento).

Figura 3.14 - Método do ensaio de compressão axial realizado nos painéis alveolares. Sequência de 1 a 3.

A aplicação do método descrito permitiu estabelecer análises e conclusões sobre as diversas etapas desenvolvidas durante a pesquisa envolvendo a execução ou viabilidade da inovação proposta no processo de produção do painel – fôrma interna incorporada e utilização de concreto adensável lançado sobre molde horizontal – e o comportamento mecânico do painel alveolar de concreto armado.

Os dados coletados e o protótipo do produto desenvolvido possibilitarão a comparação do estado atual da técnica com a nova proposta, analisando-se os resultados obtidos, bem como projetando a continuidade da pesquisa em vista de suas limitações.

É importante destacar que toda a técnica aqui utilizada com a produção do núcleo a partir de fibra de vidro deve ser considerada como aproximação apenas suficiente para viabilizar a produção do protótipo experimental. Na realidade, o núcleo deve ser produzido em escala industrial a partir de materiais provenientes de resíduos que apresentem tal potencialidade. Uma das possibilidades mais viáveis consiste em utilizar resíduos de embalagens Tetrapack na produção das chapas que irão compor o núcleo alveolar. Esta possibilidade é factível, todavia não houve condição de ser implementada neste trabalho, considerando a indisponibilidade de terceirização da empresa que atua neste mercado. Tal alternativa está demonstrada no Capítulo 4, na qual confeccionou-se um protótipo a partir da adaptação de telhas onduladas para a confecção do núcleo.

4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESEMPENHO MECÂNICO

4.1.1. Corpos de prova cilíndricos de microconcreto

Conforme exposto no Capítulo 3, a definição do traço do microconcreto foi definida em função de um comportamento mecânico definido por um modelo teórico de ruptura do painel por flambagem durante o ensaio de compressão axial.

Foram moldados 18 (dezoito) corpos-de-prova, sendo 9 (nove) na oportunidade da concretagem do Painel 1 e 9 (nove) na concretagem do Painel 4. De cada uma dessas amostras, 6 (seis) foram submetidas à ensaio de compressão e 3 (três) ao ensaio de módulo de elasticidade.

No ato da concretagem, foi reservado material para o ensaio de abatimento conforme os procedimentos descritos na NBR 7215 (ABNT, 1991) e foi confirmado abatimento médio de 252 mm. Os ensaios de compressão foram realizados aos 7 e 14 dias de idade. Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados em idades avançadas

O resultado dos ensaios de resistência à compressão estão expostos na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Resistência à Compressão do microconcreto – amostras da concretagem do Painel 1

Amostra		Resistência à Compressão (MPa)	
		f_{c7}	f_{c14}
Painel 1	Cp1	11,00	-
	Cp2	11,10	-
	Cp3	11,40	-
	Cp4	-	12,70*
	Cp5	-	13,40
	Cp6	-	14,60*
Médias		11,12	13,57
Desvio Relativo (%)		2,52	1,25
Desvio Padrão		0,21	0,96
Coef. Variação (%)		0,03	0,62

Tabela 4.2 – Resistência à Compressão do microconcreto – amostras da concretagem do Painei 4

Amostra		Resistência à Compressão (MPa)	
		f_{c7}	f_{c14}
Painei 4	Cp1	11,10	-
	Cp2	11,80	-
	Cp3	11,50	-
	Cp4	-	11,90
	Cp5	-	13,10
	Cp6	-	12,70
Médias		11,47	12,57
Desvio Relativo (%)		3,22	5,33
Desvio Padrão		0,35	0,61
Coef. Variação (%)		0,08	0,25

Verifica-se que nas amostras da concretagem do Painei 1, houve um ganho de resistência mecânica médio de 22%, enquanto que nas amostras do Painei 4 esse incremento foi de aproximadamente 9%.

As resistências mecânicas alcançadas foram satisfatórias se considerarmos as propriedades desejáveis para o microconcreto, conforme exposto no Capítulo anterior, na Tabela 3.6.

Ressaltamos que esta resistência foi estipulada pelas limitações de equipamento, tendo em vista o modelo teórico do comportamento do painel submetido à compressão, não sendo recomendada a sua aplicação prática. A resistência característica de concretos para este fim deve ser de no mínimo 25 MPa.

Quanto ao abatimento aferido, observou-se durante a concretagem que a consistência determinada é adequada, permitindo o completo adensamento e preenchimento do molde, além de um bom acabamento superficial, viabilizando o procedimento de concretagem em molde horizontal, mais apropriado para a produção de painel em pequenos módulos, ou seja, para empreendimentos de autogestão por exemplo.

O ensaio de Módulo de Elasticidade foi realizado conforme as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2003). As 3 amostras de cada concretagem foram conservadas em câmara úmida por 28 dias, sendo que na data de ensaio uma delas foi submetida à compressão e nas duas restantes foram determinados os módulos de elasticidade, aplicando-se descarregamentos relativos à aplicação de 30% da carga de ruptura.

A Tabela 4.3 demonstra o Módulo de Elasticidade aferido nas amostras extraídas dos Painéis 1 e 4.

Tabela 4.3 – Módulo de Elasticidade do microconcreto – concretagem do Painel 1 e 4.

Amostra	Resistência à Compressão		Módulo de Elasticidade
	(MPa)		(GPa)
		f_{c28}	E_{28}
Painel 1	Cp7	13,70	-
	Cp8	-	18,5
	Cp9	-	17,8
Painel 4	Cp7	13,10	-
	Cp8	-	17,9
	Cp9	-	17,7

Os resultados obtidos demonstram que as propriedades desejáveis citadas anteriormente foram alcançadas. A adição de aditivo incorporador de ar (Vedalit) pode ter influenciado na resistência à compressão, que ficou um pouco abaixo daquela almejada (em torno de 15 MPa), entretanto, o módulo de elasticidade obtido foi muito próximo de 18 GPa.

4.1.2. Painéis alveolares submetidos à compressão axial

Os painéis foram curados em ambiente interno do LCC, umedecidos e devidamente cobertos com lona plástica durante 7 dias. As desmoldagens ocorreram após três dias da concretagem. Os painéis foram estocados na posição horizontal até a data de ensaio.

Os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de compressão simples em painéis alveolares

PAINEL	Idade (dias)	CARGA		TENSÃO		δ rup. (mm)	δ média. (mm)
		DE RUPTURA (kgf)	f_{pa} (MPa)	descarga (kgf)	δ máx. (mm)		
1	67	11700,00*	2,61	-	8,90	8,90	3,30
2	64	14500,00*	3,24	5000	12,56	12,56	2,86
3	61	17500,00	3,91	5000	4,00	4,00	1,44
4	58	16500,00	3,68	5000	1,16	-0,65**	0,54
MÉDIA		15050,00	3,36	-	-	6,20	2,04
Desvio Relativo (%)		2,9					

* resultado descartado para efeito de Desvio relativo.
 ** valor negativo indica alongamento da haste do transdutor.
 Área bruta da seção: média aproximada de 446,5cm²

Em termos comparativos, é possível estabelecer algumas correlações entre a resistência mecânica à compressão dos painéis e dos corpos-de-prova da seguinte maneira:

Tabela 4.5 – Correlação resistência mecânica de Painel e dos corpos-de-prova

Elemento	Resistência à Compressão Média (MPa)
Corpo-de-prova *	13,07
Painel **	3,61
Correlação Painel/Corpo-de-Prova	27,6%

* Média total f_{c14} das amostras
 ** Descartando o Painel 1

A leitura de dados, obtidos em intervalos de incremento de carga a cada 500Kgf até a estabilização do carregamento e da deformação lateral aferida nos defletômetros é visualizada nos seguintes gráficos:

Figura 4.1 – Gráfico tensão por deformação Paine1 1

Figura 4.2 – Gráfico tensão por deformação Paine1 2

Figura 4.3 – Gráfico tensão por deformação Painel 3

Figura 4.4 – Gráfico tensão por deformação Painel 4

Figura 4.5 – Gráfico comparativo do comportamento tensão por deformação

O ensaio do Paine 1 obteve resultados diferenciados por conta do método de aplicação da carga. Considerando o modelo teórico, estipulou-se neste primeiro ensaio que a leitura de dados seria realizada a cada incremento do carregamento em 1000Kgf até 20ton, onde haveria o descarregamento para posterior incremento até a ruptura.

Entretanto, ocorreu que o Paine 1 rompeu com a aplicação de 11,7ton de carga, com deformação de 8,9 mm, ou seja, uma deformação equivalente à 0,42% ou 1/242 da altura do paine 1.

A partir de então, o procedimento de ensaio dos demais painéis foi o seguinte: incremento de carga até 5000 kgf (obtendo-se a leitura de dados a cada aplicação de 500 kgf); descarregamento até valores entre 500 e 1000 kgf e novo incremento até a ruptura. Verificou-se que as resistências alcançadas foram superiores e essa diferença pode ser atribuída à uma melhor distribuição das tensões e deformações (fluência) permitindo uma acomodação das estruturas internas do concreto armado antes da ruptura.

Em valores relativos, verifica-se que a média da resistência dos três painéis restantes foi de aproximadamente 40% maior que a alcançada pelo primeiro protótipo.

Nos quatro painéis a ruptura ocorreu de maneira frágil, sem o surgimento de fissuras ao longo da peça. Durante a aplicação do carregamento eram percebidos pequenos destacamentos nos bordos superiores e inferiores (camada de acabamento superficial). Próximo à carga crítica verificou-se o aumento brusco da deformação lateral.

Neste aspecto, confirmou-se o modelo de ruptura teórico característico de elementos esbeltos. As Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 ilustram as características da ruptura dos painéis.

1) Destacamentos nos bordos durante a aplicação de carga

2) Ruptura próxima ao bordo inferior.

3) Detalhe da contraface à ruptura

4) Detalhe da ruptura – aderência entre o núcleo e o microconcreto

Figura 4.6 – Detalhes da ruptura do Painel 1 - seqüência de 1 a 4

1) Destacamentos no bordo superior durante a aplicação de carga

2) Ruptura próxima ao bordo inferior.

3) Detalhe da contraface à ruptura

4) Detalhe da ruptura – aderência entre o núcleo e o microconcreto

Figura 4.7 – Detalhes da ruptura do Painel 2 - seqüência de 1 a 4

1) Destacamentos no bordo superior durante a aplicação de carga

2) Ruptura próxima ao bordo superior.

3) Detalhe da contraface à ruptura

4) Detalhe da ruptura – aderência entre o núcleo e o microconcreto

Figura 4.8 – Detalhes da ruptura do Painel 3 - sequência de 1 a 4

1) Destacamentos no bordo inferior durante a aplicação de carga

2) Ruptura próxima ao bordo superior.

3) Detalhe da face e da contraface do painel rompido

4) Detalhe da ruptura – aderência entre o núcleo e o microconcreto

Figura 4.9 – Detalhes da ruptura do Painel 4 - seqüência de 1 a 4

Apesar da divergência de valores entre as cargas aplicadas, observou-se que os comportamentos de distribuição interna dos esforços nos painéis seguiram um padrão: o colapso ocorreu a uma distância aproximada de 40 cm de uma das bordas.

Nos painéis 2, 3 e 4, ocorreram fissuras nas duas faces da peça, o que indica que houve transferência de esforços de uma face à outra, verificando que o mecanismo de solidarização das armaduras e das matrizes cimentícias é adequada e recomendada.

No painel 1 não foi observado este fenômeno provavelmente por conta da aplicação de carga contínua, impossibilitando a fluência das tensões na peça o que resultou no destacamento brusco entre as faces. Ressaltamos que os resultados obtidos simulam uma situação de apoio móvel nas extremidades e que, portanto, em condições de ancoragem com as fundações, os resultados seriam muito mais satisfatórios como veremos adiante.

A característica do microconcreto é de fundamental importância neste componente. Observou-se que, por conta das propriedades da matriz, a aderência entre a mesma e o núcleo alveolar e as barras de fibra de vidro ficou prejudicada. Percebe-se este comportamento nas seqüências número 4) das Figuras 4.6 e 4.8. Em painéis constituídos de núcleos que possam contribuir com o sistema estrutural, a aderência entre a matriz cimentícia e o material constituinte é importante.

1) Vista da ruptura do painel 3

2) Detalhe da armadura de fibra de vidro

3) (ao lado) Detalhe do descolamento entre as barras longitudinal e transversal

Figura 4.10 - Detalhe da ruptura do Painel 3 – comportamento da interface entre matriz e barra de fibra de vidro – seqüência de 1 a 3.

1) Vista da ruptura do painel 1

2) Detalhe da falta de aderência entre microconcreto e núcleo

3) Aspecto geral da ruptura nas ligações entre os vales do núcleo

4) Detalhe da ruptura do microconcreto na ligação entre as duas faces do painel

5) Detalhe acabamento do microconcreto

6) Detalhe da ruptura da armadura de fibra de vidro

Figura 4.11 - Detalhe da ruptura do Painel 1 – comportamento da interface entre matriz, núcleo alveolar e barra de fibra de vidro - sequência de 1 a 6.

Em análise às Figuras 4.10 e 4.11, é possível afirmar que não houve contribuição do núcleo alveolar na distribuição dos esforços, por conta da ausência de aderência deste com o microconcreto.

O adesivo CIANO CA-3 mostrou-se adequado para a montagem das armaduras. Observa-se na seqüência 6) da Figura 4.11 que a linha de ruptura está localizada imediatamente após a junção entre as armaduras transversal e longitudinal.

É possível observar que houve aderência entre o *rebar* de fibra de vidro e o microconcreto e que tal fato pode ser melhorado com a presença de nervuras no tratamento superficial deste material.

A ligação entre as armaduras das duas faces do Painel deve ser melhorada. A amarração com arame recozido mostrou-se pouco eficiente, servindo apenas como elemento auxiliar de montagem.

As características da ruptura do microconcreto nos “vales” do núcleo alveolar demonstram que essa é a parte mais frágil da estrutura interna do painel, o que orienta para a necessidade de desenvolver o design deste componente com maior área de comunicação entre as faces, pois a resistência mecânica do painel é afetada pelos mecanismos de solidarização entre as mesmas.

Os valores de resistência obtidos e as características da ruptura dos painéis demonstram que houve uma grande influência do alvéolo transversal no enfraquecimento da seção e conseqüentemente da perda de resistência, verificando-se a necessidade de se rever o modelo teórico apontado no Capítulo 3.

Em princípio essa seção foi descartada do cálculo da carga crítica, considerando-se apenas a geometria da seção longitudinal. A ocorrência de ruptura a aproximadamente 40 cm dos bordos é coincidente após o posicionamento do alvéolo transversal.

Considerando a geometria da seção longitudinal, o cálculo de I pode derivar de uma composição entre as formas retangulares e as conformações elípticas, conforme demonstra a Figura 4.12:

Figura 4.12 – Dimensões das seções do painel desenvolvido (medidas em centímetros)

Assim, o Momento de Inércia da seção, considerando os valores médios das cargas críticas aferidas e a influência dos alvéolos transversais, seria da ordem de $417,05\text{cm}^4$, ou seja, aproximadamente 20% do valor calculado anteriormente. Conforme demonstrado anteriormente, a carga crítica de flambagem e Momento de Inércia são grandezas diretamente proporcionais, o que explica que as cargas obtidas foram em média 80% menores que as simuladas no modelo teórico (aproximadamente 90ton).

Isto posto, considerando as médias dos resultados obtidos, teríamos os seguintes análises de comportamentos para painéis produzidos com essa geometria:

Figura 4.13 – Gráfico E por Carga crítica do comportamento real do Painel

Figura 4.14 – Gráfico E por Carga crítica comparativo entre o comportamento real do Painel e do modelo teórico

Considerando as análises acima é possível visualizar a influência do Momento de Inércia (I) real e o teórico na carga crítica de flambagem em função do Módulo de Elasticidade do concreto a ser utilizado. Percebe-se que para concretos recomendados para peças pré-moldadas (f_{ck} mínimo de 25MPa e E aproximadamente 27GPa), a carga crítica seria elevada a patamares próximos à 30 ton.

Outro fator importante a considerar é o comprimento de flambagem, pois quanto maior este parâmetro, menor a carga crítica a qual o Painel suportará. Tendo em vista as disposições do Decreto Estadual nº 12.342 (SÃO PAULO, 1978), em especial no artigo 97; e o propósito deste trabalho que é a apropriação da tecnologia de painéis alveolares para habitações de interesse social, é pertinente analisar o comportamento mecânico para $L=2,40m$, ou seja, a dimensão mínima de pé-direito exigida em HIS.

Figura 4.15 – Gráfico E por Carga crítica simulando L=2,40m

Figura 4.16 – Gráfico E por Carga crítica comparativo entre os Painéis ensaiados (L=2,15m) e simulação L=2,40m

As análises demonstram que em painéis produzidos com as mesmas características geométricas da seção, variando-se as propriedades do microconcreto, a carga crítica de flambagem sofreria decréscimos consideráveis (de aproximadamente 3 ton a 6 ton) aumentando o comprimento da peça de 2,15m para 2,40m.

Assim sendo, se forem considerados constantes E , f_{ck} e características geométricas da seção, é possível observar o seguinte:

Figura 4.17 – Influência do comprimento de flambagem na carga crítica para $E=18\text{GPa}$

As análises sobre os resultados obtidos permitem traçar um panorama das variáveis para a seção geométrica do painel desenvolvido, o que evidencia que o design do componente é de fundamental importância para se obter um produto viável. Os alveolos transversais devem ser utilizados com muito critério, pois é patente o enfraquecimento da peça em função de sua existência.

Outra questão importante é que a espessura do protótipo desenvolvido (8cm) pode ser um fator limitante para se obter uma maior resistência mecânica. Entretanto, tendo em vista que o objetivo deste trabalho é a apropriação da tecnologia de painéis alveolares em habitações de interesse social, a NBR 15575 (ABNT, 2008) estabelece que para casas térreas e sobrados, cuja altura total não ultrapasse 6,0 m (desde o respaldo da fundação de cota mais baixa até o topo da cobertura), não há necessidade de atendimento às dimensões mínimas dos componentes estruturais estabelecidas nas normas de projeto estrutural específicas de concreto (ABNT 2004b e 2006) resguardada a demonstração da segurança e estabilidade através de ensaios destrutivos e do traçado do correspondente diagrama carga x deslocamento.

A mesma norma determina que para atender à necessidade de segurança estrutural, sob o critério de estados limites de serviço sob a ação de cargas gravitacionais os componentes estruturais não devem apresentar:

- fissuras com aberturas superiores a 0,6 mm em qualquer situação;
- deslocamentos maiores que os demonstrados na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Deslocamentos limites segundo ABNT NBR 15575

Razão da limitação	Elemento	Deslocamento limite	Tipo de deslocamento
Visual / insegurança psicológica	Pilares, paredes, vigas, lajes (componentes visíveis)	$L / 250$ ou $H / 300^{(1)}$	Deslocamento final incluindo fluência (carga total)
Destacamentos, fissuras em vedações ou acabamentos, falhas na operação de caixilhos e instalações	Caixilhos , instalações, vedações e acabamentos rígidos (pisos, forros etc)	$L / 800$	Parcela da flecha ocorrida após a instalação da carga correspondente ao elemento em análise (parede, piso etc)
	Divisórias leves, acabamentos flexíveis (pisos, forros etc)	$L / 600$	
Destacamentos e fissuras em vedações	Paredes e/ou acabamentos rígidos	$L / 500$ ou $H / 500^{(1)}$	Distorção horizontal ou vertical provocada por variações de temperatura ou ação do vento, distorção angular devida ao recalque de fundações (deslocamentos totais)
	Paredes e acabamentos flexíveis	$L / 400$ ou $H / 400^{(1)}$	

H é a altura do elemento estrutural
 L é o vão teórico do elemento estrutural

⁽¹⁾ Para qualquer tipo de solicitação, o deslocamento horizontal máximo no topo do edifício deve ser limitado a $H_{total} / 500$ ou 3 cm, respeitando-se o menor dos dois limites.

Como foi observado nos ensaios realizados, considerando a deformação (ou deslocamento) médio obtido pela ruptura do elemento foi da ordem de 1/347 da altura do elemento estrutural (6,20mm) e não ocorreram fissuras durante a aplicação da carga, fato que enquadra o elemento nas condições descritas na referida Norma.

Ressalta-se que as análises se pautaram pelo ensaio à compressão do elemento simplesmente apoiado, ausente de qualquer ancoragem e grauteamento de alvéolos verticais que podem conferir maior rigidez e resistência ao painel. De forma análoga à alvenaria estrutural, o projeto arquitetônico – distribuição do arranjo de paredes e modulação de vãos – vai interferir no desempenho estrutural do conjunto, fato que deflagra que a utilização destes elementos precede de mais análises sobre o seu comportamento mecânico.

4.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PAINEL ALVEOLAR

Os resultados obtidos apontam que o processo de produção do painel alveolar proposto neste trabalho é viável, sendo que as inovações introduzidas influenciaram-no potencialmente.

Observou-se que a moldagem do painel com microconcreto adensável com a utilização de vibrador é apropriada, pois se garantiu o completo preenchimento do molde mesmo sendo executado em posição horizontal.

Concretagens na posição vertical também serão possíveis. Entretanto, é necessário um sistema de fôrmas mais elaborado, suficientemente rígidas para suportar a pressão de lançamento, investimento que se justifica em produções seriadas (painéis de paredes alveolares monolíticas moldadas in loco).

A fôrma executada em madeira não sofreu danos durante a moldagem dos quatro painéis, configurando-se em solução de baixo custo e apropriada em locais onde se dispõe deste recurso, podendo ser reutilizada com os mesmos benefícios das fôrmas tradicionalmente empregadas na caixaria de concreto armado.

O painel produzido pesa aproximadamente 120Kg e equivale à 1,19m², obtendo-se peso próprio aproximado de 101 Kgf/m² ou 1,01 KN/m². Esse valor é menor que alguns valores típicos de alvenarias de tijolos cerâmicos ou blocos de concreto, conforme se demonstra a seguir:

		Esp. bloco	Peso (KN/m ²)
Alvenaria de vedação de tijolos maciços, com revestimento argamassado nas duas faces	9	2,7
		19	4,0
Alvenaria de vedação de tijolos cerâmicos de 8 furos, com revestimento argamassado nas duas faces	9	1,5
		19	2,3
Alvenaria de vedação de blocos vazados de concreto, aparente ou revestida com pasta de gesso	7	1,3
		9	1,4
		11,5	1,5
		14	1,7
		19	2,0

Figura 4.18 – Peso próprio em função de espessura de algumas alvenarias. Fonte: <http://www.tatu.com.br>

No Capítulo 2, Tabela 2.5, foram demonstradas algumas especificações de dimensões de painéis alveolares disponíveis no mercado. Na figura abaixo, apresentam-se algumas

propriedades geométricas das seções transversais e peso próprio dos painéis alveolares produzidos pela Tatu Pré-Moldados:

SEÇÃO TRANSVERSAL		CARACTERÍSTICAS
PAINEL LEVE		Altura=9cm Peso-Próprio=1,50KN/m ² I=5432cm ⁴ /m
	Altura=12cm Peso-Próprio=2,10KN/m ² I=13247cm ⁴ /m
	Altura=16cm Peso-Próprio=2,45KN/m ² I=29178cm ⁴ /m
	Altura=20cm Peso-Próprio=2,80KN/m ² I=52948cm ⁴ /m
	Altura=25cm Peso-Próprio=3,20KN/m ² I=95152cm ⁴ /m

Figura 4.19 – Características geométricas das seções transversais e peso próprio de painéis alveolares disponíveis no mercado nacional. Fonte: <http://www.tatu.com.br>

Os resultados apontam que em valores relativos houve significativa redução de peso próprio da peça em função das características geométricas da seção do painel.

Ressalta-se que as faces do painel possuem bom acabamento, propiciando a aplicação direta da pintura e revestimentos cerâmicos assentados com argamassa colante. É possível inclusive modular as placas (e por consequência os vãos de projeto) de maneira flexível e promover o revestimento antes do assentamento das placas na obra.

Quanto à questão da sustentabilidade do processo de produção do painel, além da citada redução do desperdício de materiais e energia, é possível propor o encapsulamento de resíduos agroindustriais tanto na composição do concreto quanto na fôrma interna.

A fôrma interna incorporada que compõe o núcleo alveolar é a grande inovação que permite apropriar essa tecnologia para sua produção artesanal, pois pode utilizar-se de material leve e facilmente manuseável na sua composição. A fabricação dos painéis que antes demandava pistas de concretagens e maquinário de corte passa a ser realizada em módulos, gerando mínimo resíduo.

Os painéis ensaiados foram produzidos com núcleo alveolar composto de uma fôrma de manta de fibra de vidro e resina poliéster, entretanto o processo aponta a potencialidade de utilizar outros materiais como fibras naturais de coco, de cisal, ou de curauá, ou ainda com resíduos de embalagens Tetrapak, de aparas de embalagens de tubos de creme dental ou de garrafas PET.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, o primeiro tipo de experiência foi realizado com o emprego de telhas onduladas produzidas de material reciclado de Tetrapak, disponíveis no mercado, produzidas pela empresa Ibaplac, localizada no município de Ibaté/SP.

As figuras abaixo apresentam este primeiro teste, no qual já se delineava o método de produção, ou seja, as chapas colocadas uma sobre a outra, rebitadas para conformar o núcleo alveolar, abrindo-se uma janela no sentido longitudinal para possibilitar a ligação entre as faces do painel.

1) Núcleo alveolar composto de telha ondulada de Tetrapak

2) Vista geral do conjunto no molde do painel

3) Preenchimento do modelo com concreto leve (ao lado)

4) Modelo acabado (abaixo)

Figura 4.20 – Produção de protótipo de painel alveolar cujo núcleo é composto por telhas onduladas produzidas de material reciclado de embalagens Tetrapack (seqüência de 1 a 4)

O núcleo alveolar de fibra de vidro mostrou-se bastante viável nesta aplicação. Ressalta-se que as dimensões do painel serão determinadas em função da modulação mais adequada do projeto específico da edificação, visando viabilizar as operações de transporte e montagem dos elementos de painéis, sejam eles moldados “in loco” ou em pistas.

A fôrma sobreposta em sentido transversal proporciona uma adequada compatibilidade e conectividade com subsistemas de eletrodutos, permitindo posicionar tubulações de maneira racionalizada, conforme as especificidades de projeto.

Ressalta-se que este elemento deve ser utilizado com critério, pois conforme exposto anteriormente, a sua presença acarreta no enfraquecimento da peça por influência no Momento de Inércia. Para o protótipo desenvolvido, houve certa dificuldade em produzi-la por conta da concordância necessária entre as “ondas” e “vales” que conformam o núcleo alveolar.

A Figura 4.21 apresenta os detalhes da fixação de eletrodutos e caixas de eletricidade, simulando a seqüência de operações de montagem do painel alveolar.

1) Corte de uma das chapas que compõem o núcleo alveolar

2) Posicionamento da caixa

3) Posicionamento dos eletrodutos fixados à chapa por meio de braçadeiras de plástico

4) Vista do conjunto dos eletrodutos e caixas já montados e fixados à chapa

5) Colocação da chapa superior (ao lado)

6) Montagem do alvéolo, pela justaposição das chapas.

7) Vista do eletroduto no interior do alvéolo

8) Pannel com instalações acabado

Figura 4.21 – Produção de painel alveolar contendo instalações elétricas embutidas (seqüência de 1 a 8).

Observou-se que as canalizações podem ser posicionadas e fixadas no interior dos alvéolos, com uso de abraçadeiras plásticas, de maneira muito simples e com mínimo esforço, se comparado com as operações de rasgar, chumbar e embutir instalações prediais em alvenarias convencionais.

Nestes termos, a inovação do núcleo alveolar incorporado no processo de produção do painel alveolar permite projetar e executar este elemento com conceito de conectividade e lógica de sistema.

Os resultados apontaram que o processo de produção do painel alveolar é perfeitamente adaptável às condições de canteiro, projeto e recursos humanos disponíveis, o que demonstra que as inovações propostas são apropriadas ou apropriáveis em escalas e situações específicas (produzindo-se placas modulares, painéis de paredes ou ainda estruturas monolíticas in loco), implicando na aplicação dos conceitos de industrialização com uso da mão-de-obra e insumos localmente disponíveis.

4.2.1 Sugestões de processos de produção de painéis alveolares

Considerando os resultados demonstrados, essa tecnologia permitirá os seguintes processos de produção:

4.2.1.1. Produção do módulo do painel alveolar

O módulo do painel alveolar é composto por placa modular de dimensão específica da modulação adotada em projeto, objetivando a padronização de fôrmas e de vãos de altura (pé-direito, aberturas) e comprimento.

Tal possibilidade de produção em módulos visa o atendimento de demandas locais ou em usinas, que utilizem de transporte leve e local ou pesado. A concretagem é realizada na posição horizontal, dentro de fôrmas de aço, madeira ou plástico reforçado com fundo de madeirite resinado ou sobre pisos nivelados e com superfície lisa.

Quando produzidos em módulos, a sua utilização na obra acontece com a associação dos painéis sendo que a cada junção de módulo deve-se executar o grauteamento do alvéolo formado pela união de suas extremidades consolidando o sistema estrutural de paredes portantes ou de simples fechamento.

As placas são justapostas sobre as fundações, travadas por meio de andaimes auxiliares e calçadas através de cunhas de madeira para garantir a estabilidade, alinhamento, nível e prumo dos painéis da montagem das placas.

Para conferir melhor rigidez do conjunto quando unidas, sugere-se armadura de arranque das fundações e/ou do próprio painel no local de grauteamento, configurando pilaretes de concreto armado nos mesmos moldes dos que são utilizados na alvenaria estrutural armada.

As bases são preenchidas com argamassa contendo impermeabilizantes, sendo que após o período de cura, os calços podem ser retirados e os espaços que foram deixados por estes devem ser preenchidos e impermeabilizados.

A junta das faces deverá ser tratada com material cimentício ou polimérico flexível (tipo rejunte flexível ou mástique), obedecendo-se as mesmas especificações de quando utilizado em revestimentos cerâmicos de piso e azulejo no tocante ao ambiente de exposição das placas (externo ou interno).

A Figura 4.22 ilustra a associação entre painéis e a figura 4.23 representa o aspecto construtivo de associação de painéis modulares em habitações.

DETALHE DE AMARRAÇÃO ENTRE PAINÉIS CONTÍNUOS:
ARMADURA DE ARRANQUE E PREENCHIMENTO COM GRAUTE FLUIDO.
REJUNTE NA UNIÃO DAS PLACAS COM ARGAMASSA POLIMÉRICA

DETALHE DO ENCONTRO DE PAREDES (T):
ARRANQUE EM AÇO, PREENCHIMENTO COM
GRAUTE FLUIDO.

DETALHE DE AMARRAÇÃO ENTRE
PAINÉIS CONTÍNUOS:
ARMADURA DE ARRANQUE E
PREENCHIMENTO COM GRAUTE
FLUIDO. REJUNTE NA UNIÃO DAS
PLACAS COM ARGAMASSA
POLIMÉRICA

DETALHE DE AMARRAÇÃO DE CANTO
DE PAREDE:
FORMA METÁLICA EXTERNA TIPO
CANTONEIRA; ARMADURA DE
ARRANQUE ANCORADA NOS PAINÉIS
UNIÃO COM SOLDA,
PREENCHIMENTO COM GRAUTE
FLUIDO.

ENCONTRO DE PAINÉIS (T)
OPÇÃO 2:
ARMADURA DE ARRANQUE
ANCORADA NOS PAINÉIS,
FORMA METÁLICA EXTERNA
PARAFUSADA DIRETAMENTE
SOBRE O PAINEL E
PREENCHIMENTO COM
GRAUTE FLUIDO

DETALHE DE
AMARRAÇÃO DE
CANTO DE PAREDE:
UNIÃO SOLDADA DOS
ARRANQUES

DETALHE DE AMARRAÇÃO
ENCONTRO EM "T" REALIZADO POR
"GRAMPO" DE AÇO

Figura 4.22 - Esquemas representativos dos detalhes de associações de painéis

Figura 4.23 – Aspecto geral da construção de uma edificação utilizando-se painéis modulares associados

4.2.1.2. Produção de painéis de paredes alveolares

Neste caso, são produzidos painéis de paredes com dimensões modulares que compreendem todas as tubulações de instalações prediais embutidas.

A concretagem é realizada na posição horizontal, em “pistas” com piso de concreto armado devidamente nivelado e com acabamento liso e desempenado que servirá de fôrma de uma das faces da parede. Neste processo, deve-se dispor de fôrmas laterais de aço, madeira ou plástico devidamente reforçadas e travadas por meio de parafusos.

Após a produção da parede, a mesma será içada por meio de ponte rolante, “girafas” ou caminhões munk, depositando-as na posição vertical, visando desocupar a pista para nova concretagem e racionalizar a área de depósito da fábrica.

Na ocasião da montagem da estrutura, as paredes são transportadas até o local por um caminhão munk. As paredes são locadas sobre as fundações, calçadas e escoradas para garantir sua estabilidade e os ajustes necessários de esquadro, nível, alinhamento e prumo.

Na etapa seguinte são dispostas as fôrmas auxiliares para a concretagem dos cantos e encontros de paredes. Cumprida essa tarefa, procede-se o grauteamento dos mesmos, solidarizando totalmente a estrutura e criando um conjunto com comportamento monolítico.

Neste processo a produção das paredes alveolares ocorre em usinas descentralizadas ou localizadas no canteiro de obras adquirindo uma característica de planta industrial. A implantação direta no canteiro de obras é viável desde que haja espaço logístico para implantação das pistas e movimentação das máquinas que farão o transporte. As paredes

poderão também serem moldadas no próprio local de montagem e montadas em sistema de *tilt-up*.

A seguir ilustra-se a sugestão descrita, abrangendo os aspectos gerais da produção das paredes alveolares e de sua posterior montagem na obra.

Figura 4.24 – Aspecto geral da produção de painéis de paredes em usina: concretagem, desmoldagem, depósito e transporte

Figura 4.25 – Ilustração da concretagem de painéis de paredes sobre piso de concreto diretamente no canteiro de obras

1) Transporte do painel de parede até o local de montagem

2) Assentamento do painel sobre as fundações

3) Travamento dos painéis de parede

4) Detalhe da junção de canto

Figura 4.26 – Ilustração do aspecto geral da construção de uma edificação utilizando-se painéis de paredes

4.2.1.3. Produção de paredes alveolares monolíticas in loco

Neste processo, as paredes são moldadas in loco diretamente sobre as fundações, por meio da associação de fôrmas individuais unidas por parafusos e devidamente travadas umas às outras e ao solo por meio de estruturas auxiliares de sustentação. Todas as instalações são executadas previamente.

Neste caso, as paredes possuem dimensões modulares em função da associação de fôrmas. As fôrmas são estocadas no canteiro de obras, unidas umas às outras (por parafusos) para compor o molde das paredes. Procede-se com o travamento e escoramento com estruturas auxiliares de sustentação observando os ajustes de esquadro, nível, alinhamento e prumo das mesmas.

A concretagem é realizada na posição vertical. Por se tratar de uma estrutura monolítica e de alta produtividade e racionalidade, o material das fôrmas deve ser de aço ou plástico, para permitir a máxima reutilização das mesmas.

A montagem obedece à seguinte seqüência:

- 1) montagem das fôrmas externas;
- 2) posicionamento de uma das faces que irão compor o núcleo alveolar com espaçadores e armadura não metálica da face externa;
- 3) execução de tubulações de instalações prediais elétricas, hidráulicas e sanitárias;
- 5) posicionamento da outra chapa e junção com rebite para compor o núcleo alveolar.

Amarração entre as armaduras das duas faces nas conexões dos vales

- 6) montagem de fôrmas internas;
- 7) lançamento de concreto adensável;
- 8) desmoldagem e transporte de fôrmas para outro conjunto.

O método descrito pressupõe um grande investimento com relação ao conjunto de fôrmas, o que determina que a adoção do mesmo só seria viável em produções de larga escala. A Figura 4.27 ilustra o processo sugerido

1) Vista da fôrma montada

2) Desmontagem da fôrma após a concretagem

3) Aspecto acabado do sistema estrutural (ao lado)

Figura 4.27 – Visualização do processo produtivo de paredes alveolares monolíticas moldadas in loco (seqüência de 1 a 3)

4.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No aspecto do comportamento mecânico dos painéis avaliados, foi possível constatar que:

- 1) A geometria da seção exerce total influência no comportamento mecânico (resistência à compressão axial) do painel. O cálculo da carga crítica de flambagem deve ser precedido de análises numéricas (método de elementos finitos) para se determinar o estado de tensões a que este elemento estará submetido e qual a carga crítica de flambagem do mesmo.

Verificou-se que houve uma considerável redução da carga crítica aferida em relação ao modelo teórico. Tal fato se deve à redução do momento de inércia em aproximadamente 80% do que foi estimado primeiramente, resultante da influência do alvéolo transversal (sobreposto ao sentido longitudinal) que causa um enfraquecimento da seção.

Entretanto, observando a Figura 4.12, verifica-se que o método de cálculo do Momento de Inércia não deve se basear somente na relação direta entre as seções que compõem a peça. No caso em questão, se fosse aplicado o referido método, teríamos que I seria resultante das duas seções retangulares (seção “cheia” menos seção vazada):

$$I = [(B \times H^3)/12] - [(b \times h^3)/12] = [(55,5 \times 8^3)/12] - [(55,5 \times 5^3)/12] = 31,22\text{cm}^4$$

Entretanto, constatou-se que I possui valor próximo de $417,05\text{cm}^4$, uma vez que os ensaios de ruptura (resistência mecânica) e Módulo de Elasticidade realizados nos corpos-de-prova cilíndricos de microconcreto confirmaram os dados utilizados no cálculo da carga crítica teórica, ou seja, permaneceram como constantes neste sistema.

Em tese, houve contribuição da solidarização entre as faces (ligação nos vales) na distribuição de tensões internas do painel durante o carregamento.

Xie (2009) analisou o estado de tensões em painéis alveolares e demonstrou que o método de elementos finitos é adequado para estabelecer a “área de seção efetiva” e por consequência determinar o coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade do painel em função da mesma. As análises demonstraram que as tensões variam significativamente ao longo da seção transversal conforme ilustrado abaixo:

Figura 4.28 – Obtenção da área de seção efetiva em painel alveolar obtido pelo método de elementos finitos (FEM). Fonte: Xie (2009)

Assim sendo, a ligação entre as duas faces é de fundamental importância no comportamento mecânico do painel, havendo necessidade de desenvolver outros estudos (principalmente de design da seção) para que se concilie uma seção ideal em termos de consumo de material (relacionado à leveza e otimização de recursos) e desempenho mecânico (relacionado à melhor distribuição de tensões internas na peça)

- 2) Em consequência do que foi exposto anteriormente e considerando as características da ruptura do painel, o microconcreto a ser utilizado exerce considerável influência no desempenho mecânico do elemento.

Observou-se que a ruptura ocorreu nas ligações dos vales, por ocasião do esforço cortante, o que pode confirmar que houve contribuição desta área da seção na distribuição dos esforços, em contraponto com as análises da figura 4.28 realizadas em painel de alvéolo cilíndrico.

Diante disso, uma matriz mais elaborada, com menor relação água/cimento e utilização de aditivos superplastificantes deve contribuir para um melhor desempenho mecânico do painel, proporcionado inclusive por uma melhor aderência com o núcleo alveolar e as armaduras. De qualquer maneira, o abatimento é um fator relevante para que se realize a concretagem adequada do painel na posição horizontal, recomendando-se valores superiores à 240mm obtidos conforme o método descrito no Capítulo 3.

Considerando o desempenho mecânico aferido em testes de laboratório, o painel alveolar poderá ser empregado para a execução de paredes de simples fechamento e/ou paredes portantes.

Com relação ao processo de produção do painel alveolar se faz necessário destacar que:

- 1) A incorporação da fôrma interna ou núcleo alveolar propicia uma alternativa viável de se produzir o painel em módulos, apropriando a tecnologia para uma demanda local;
- 2) O painel produzido é mais leve (em termos relativos) que os painéis alveolares disponíveis comercialmente. Comparativamente às alvenarias de tijolos e blocos cerâmicos e de concreto, apresenta peso próprio inferior;
- 3) A fôrma interna poderá ser produzida com material alternativo – resíduos inertes encapsulados em matrizes poliméricas ou cimentícias – desde que sejam efetuados os devidos testes de solubilidade e lixiviação da NBR 10004 (ABNT, 2004a);
- 4) A adoção de concreto leve pode agregar valor ao produto tendo em vista o custo de transporte das usinas até o canteiro de obras, ou mesmo para transportes locais.

Entretanto essa alternativa parece ser mais viável para a aplicação com caráter fabril (paredes alveolares produzidas em usinas distantes do canteiro de obras);

- 5) Armaduras convencionais podem ser utilizadas desde que o cobrimento (espessura e característica do material constituinte) seja adequado para impedir a corrosão por carbonatação do concreto;
- 6) Existe conectividade do elemento com os outros sistemas (fundações, superestrutura, caixilhos, cobertura, instalações prediais), no entanto é necessário desenvolver para cada aplicação o detalhamento adequado e mapear quais as interfaces que precisam de maiores cuidados. O protótipo contendo eletrodutos e caixas foi produzido com extrema facilidade, demonstrando que se agregou lógica de sistema ao painel alveolar quando se propôs a incorporação do núcleo alveolar;
- 7) As sugestões de aplicação na obra carecem de maior detalhamento, pois para cada tipo de montagem haverá ferramentas auxiliares utilizadas na etapa de assentamento ou locação das placas para garantir a estabilidade do posicionamento das mesmas, garantindo também ajustes do esquadro e o nível entre as junções. Devem ser estudados também os processos de transporte de painéis modulares e paredes;
- 8) As ilustrações das sugestões relativas à produção de painéis de paredes alveolares e de paredes alveolares monolíticas in loco foram extraídas de obras realizadas com o sistema de painéis cerâmicos (Jet Casa e Conceito Construções) e de concreto celular (Rodobens) e foram inseridas para auxiliar a visualização do quanto a tecnologia é apropriável conforme a demanda do empreendimento e que pode ser adaptada para se agregar aos sistemas construtivos consolidados e em operação, quais sejam os processos construtivos: placas modulares, painéis de parede ou estruturas moldadas in loco (sistema comumente denominado parede de concreto).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme a exposição inicial deste trabalho, os objetivos desta pesquisa centraram-se na análise da introdução de uma inovação tecnológica – incorporação de fôrma interna ou núcleo alveolar – ao processo de produção de painel alveolar de concreto armado, visando ampliar o uso da tecnologia de painéis alveolares para a habitação de interesse social, para aplicação em paredes ou lajes, oferecendo a empreendimentos de pequeno porte os benefícios da racionalização e pré-fabricação da construção.

A hipótese da pesquisa vislumbrava que a tecnologia de painéis alveolares é passível de ser apropriada por meio da incorporação da fôrma interna que configura os alvéolos e utilização de concreto adensável convencional adaptando o processo de produção à demanda de cada empreendimento.

O método utilizado para a comprovação da hipótese foi a produção de protótipos de painel alveolar modular e realização de ensaio de resistência à compressão deste elemento.

Paralelamente, foram realizados ensaios auxiliares em laboratório para a caracterização de agregados, cimento Portland, microconcreto adensável de baixo módulo de elasticidade e demais materiais constituintes dos protótipos dos painéis.

Assim sendo, as principais conclusões são:

a) O método de produção de painel alveolar com fôrma interna incorporada (núcleo alveolar) é viável tecnicamente. A concepção da produção do painel alveolar desenvolvida neste trabalho possibilita substituir o método de produção em fôrmas fixas ou por extrusão - que dependem de uma estrutura fabril – por alternativas realizadas em diversas escalas, apropriadas às características disponíveis em termos de porte do empreendimento, condições do canteiro e disponibilidade de mão-de-obra. Os painéis poderão ser produzidos em módulos (placas), painéis de paredes ou ainda configurando estrutura monolítica moldada in loco;

b) Observou-se que a moldagem do painel com microconcreto adensável é apropriada para a produção do elemento. Houve total preenchimento do molde e obteve-se bom acabamento das faces do painel o que permite a aplicação direta da pintura e outros revestimentos. Recomenda-se microconcretos com abatimento maior que 240 mm – para lançamento em molde horizontal utilizando-se vibrador – ou ainda autoadensáveis desde que comprovada a sua viabilidade;

c) Não houve aderência adequada entre o microconcreto e o núcleo alveolar, o que se justifica pelas características da matriz de cimento (alta relação água/cimento e ar incorporado);

d) Os alvéolos do núcleo alveolar poderão ter formato circular, elíptico ou hexagonal. Esse formato deverá ser definido pelos seguintes critérios:

- consumo de material para a fabricação da fôrma interna, incorporada ao painel;
- rigidez e características geométricas da seção do painel;
- relação definida como “ótima” que proporcione desempenho mecânico adequado ao uso que se pretende do painel (paredes ou lajes) configurando o maior percentual de vazios, ou seja, a menor área líquida efetiva da seção, o que tem implicações diretas sobre o peso da peça e da estrutura final;

e) A montagem das chapas das faces do núcleo alveolar com rebites é adequada do ponto de vista de sua execução, podendo ser empregado outros sistemas para possibilitar a conformação do alvéolo, como colagem, por exemplo;

f) A incorporação de fôrma interna e a produção de painéis alveolares em módulos apresenta facilidade de manuseio, pois em geral as peças terão dimensões que possibilitam montagem e transporte manual do núcleo;

g) A fôrma sobreposta em sentido transversal proporciona compatibilidade e conectividade com subsistemas de instalações elétricas, permitindo o desenvolvimento de prumadas e tubulações em diversos sentidos no painel. Entretanto, verificou-se que houve uma considerável redução da carga crítica aferida em relação ao modelo teórico devido à diminuição do momento de inércia resultante da presença do alvéolo transversal. Diante disso, tal utilização deve ser observada com critério, considerando, além das especificações de resistência do elemento pré-moldado, a característica do arranjo estrutural do projeto da edificação;

h) Os vales perfurados do núcleo alveolar que permitem a interligação das faces do painel devem possuir a maior área possível, pois se observou a ocorrência de ruptura por esforço cortante nesta região;

i) O *rebar* de fibra de vidro é uma alternativa viável para esta aplicação, tendo em vista a pequena espessura de cobrimento da armadura. Entretanto, a utilização de telas de aço eletrosoldadas não é descartada, desde que as características da matriz do microconcreto promovam uma espécie de compensação da espessura e configurem adequada proteção à corrosão das mesmas;

j) A amarração transversal entre as armaduras das faces do painel precisa ser aprimorada para obter efetiva contribuição na resistência mecânica do painel. Neste protótipo optou-se pela amarração com arame recozido e observou-se que esta solução serviu apenas para auxiliar a montagem do núcleo armado. Neste aspecto, o *rebar* de fibra de vidro apresenta deficiência com relação ao aço, pois não possibilita a dobra da barra para configurar um estribo, necessitando, portanto, do desenvolvimento de elementos específicos para este fim;

k) O procedimento adaptado da NBR 8949 (ABNT, 1985) para a avaliação de desempenho mecânico do painel mostrou-se satisfatório, tendo em vista as semelhanças com as ações de carregamento que ocorrem em paredes verticais de alvenaria.

Sugestões para o prosseguimento da pesquisa

A pesquisa propicia uma série de temas para continuidade, como os sugeridos a seguir:

- estudo das características geométricas da seção aplicando-se o método de elementos finitos;

- analisar a incorporação de resíduos que sejam compatíveis com a matriz cimentícia do microconcreto a ser utilizado na produção de painéis, avaliando o impacto de tais adições nas propriedades do compósito no estado fresco e endurecido;

- analisar a substituição parcial ou total de armadura por concreto reforçado com fibras;

- avaliar a viabilidade de se produzir o núcleo alveolar com resíduos agroindustriais incorporados em matrizes poliméricas (inclusive resinas naturais) ou cimentícias, uma vez que o núcleo encoberto pelas camadas de cobrimento de concreto apresenta potencial para encapsulamento de resíduos, desde que o material resultante seja compatível com a matriz de cimento Portland, ou seja, não ocorram reações deletérias na interface núcleo/microconcreto que comprometam o desempenho destes materiais. Citam-se: fibras naturais, resíduos de embalagens Tetrapack, PET, aparas de tubo de creme dental, compósitos melanímicos dentre outros;

- avaliar os materiais e o painel produzidos com resíduos quanto à condição de encapsulamento (lixiviação e solubilidade) em conformidade com as Normas Técnicas pertinentes;

- submeter os painéis alveolares ao ensaio de flexão (uso em lajes);

- avaliar os painéis em ensaios de impacto de corpo mole e corpo duro;

- estudar novos métodos de montagem do núcleo alveolar armado, propondo novas conexões, ferramentas, encaixes e processos para embutimento das instalações prediais;
- avaliar em ensaios mecânicos o sistema de juntas proposto em ligações de painéis contínuos, cantos e encontro cruzados (“T” e “X”). Verificar a influência da resistência do graute de preenchimento na resistência do conjunto;
- avaliar o sistema de tratamento de juntas de placas modulares quanto à estanqueidade e fissuração;
- desenvolver o projeto de fôrmas para as opções de produção propostas (placa, painel de parede e estrutura monolítica moldada in loco);
- desenvolver o projeto executivo e projeto para a produção de uma tipologia habitacional, analisando os pontos críticos de execução e a conectividade com os outros sistemas construtivos, utilizando o elemento como superestrutura (paredes portantes e lajes);
- detalhar os possíveis encaixes, as fôrmas auxiliares e os processos construtivos tendo em vista as sugestões de aplicação do painel alveolar exploradas no capítulo 4. Avaliar a possibilidade de montagem a seco;
- avaliar o desempenho termo-acústico do painel alveolar produzido com diferentes núcleos;
- propor sistemas de aeração forçada e/ou natural utilizando-se dos alvéolos de modo a favorecer o conforto térmico no interior da edificação;
- avaliar as condições de desempenho e reação ao fogo do painel alveolar considerando a configuração do núcleo alveolar (em função das alternativas de materiais que podem compor o núcleo), bem como a substituição de armadura metálica por *rebars* de fibra de vidro;
- avaliar os índices de produtividade da mão-de-obra envolvida na produção dos painéis e sua respectiva montagem na obra, segundo duas possibilidades: produção em canteiro ou produção em centrais de pré-fabricados;
- avaliar os custos de implantação e os benefícios da aplicação de núcleos alveolares em sistemas construtivos consolidados, quer seja pela montagem de placas modulares, painéis de paredes pré-fabricadas ou paredes monolíticas moldadas in loco (sistema parede de concreto), verificando o impacto desta inovação em termos de diminuição de aproximadamente do volume de concreto, durabilidade e reaproveitamento das fôrmas, condição de execução e manutenção de instalações prediais elétricas, hidráulicas e sanitárias embutidas nas paredes;

- verificar os fatores de mitigação de impactos desta tecnologia em habitações de interesse social pode oferecer, e avaliar a sustentabilidade de sua utilização pelos seguintes critérios:

- uso da mão-de-obra e insumos localmente disponíveis;
- possibilidade de encapsulamento de resíduos agroindustriais na composição do concreto e na fôrma interna;
- racionalização de processos construtivos de edificações;
- compatibilização e conectividade com outros sistemas construtivos (estruturas de concreto convencionais ou metálicas, pré-fabricados ou alvenaria) e subsistemas de instalações prediais;
- flexibilidade de projeto (coordenação modular variável);
- menor consumo energético de transporte de materiais e insumos, ou seja, melhoria da logística do canteiro de obras;
- menor consumo geral de recursos humanos e materiais no processo de produção da edificação;
- desempenho termo-acústico do painel, considerando a presença do núcleo alveolar;
- logística reversa em decorrência da reciclabilidade do elemento.

- estudar a influência desta tecnologia na implantação de Programas Habitacionais de Interesse Social de autogestão e sua inter-relação com dispositivos legais como Plano Diretor, e planos de desenvolvimento locais de gestão e gerenciamento de resíduos;

- projetar as situações de canteiro de obras dos processos propostos, estabelecendo áreas e instalações mínimas para determinada produção diária de painéis;

- estabelecer os parâmetros mais importantes e fundamentais para que se promova a transferência de tecnologia (dos materiais, processos de produção do elemento, capacitação de mão-de-obra e montagem) para o setor produtivo e demais agentes promotores da construção de habitações, explorando o potencial instalado das empresas do setor e instrumentos dos órgãos de administração direta e indireta do poder público.

REFERÊNCIAS

ABIKO, A.K. (1987). **Estabilização de solos com cimentos pozolânicos de cinza da casca de arroz e de resíduos cerâmicos**. 92p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

ADESANYA, D.A. (1996). Evaluation of blended cement mortar, concrete and stabilized earth made from ordinary Portland cement and corncob ash. **Construction and Building Materials**, Reigate, v.10, n.6, p.451-456, Sept.

ADETUNJI, I.; PRICE, A.D.F.; FLEMING, P. (2008). Achieving sustainability in the construction supply chain. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: engineering sustainability**, London, v.161, n.3, p.161-172, Sept.

AGENDA 21. (1998). **Conferência das Nações Unidas sobre ambiente e desenvolvimento urbano**. Brasília, DF: Subsecretaria de Edições Técnicas do Senado Federal.

AGENDA 21 for sustainable construction in developing countries. How professionals think in action. (2002). Pretoria: CSIR Building and Construction Technology.

AİTCIN, P.C. (2000). **Concreto de elevado desempenho**. São Paulo: Pini.

ALAEJOS, P. et al. (2004). Draft of spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings...** França: Elsevier.

ALEXANDER, S. (2003). Deflection, shortening and cracking caused by shrinkage in reinforced sections, in situ toppings and composite slabs. In: ROLE CONCRETE IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT INTERNATIONAL SYMPOSIUM DEDICATED TO PROFESSOR SURENDRA SHAH, 2003, Northwestern. **Proceedings...** London: Thomas Telfor. p.431-440.

ALMEIDA, I.R. (1996). Superplastificantes, microsílica e durabilidade dos concretos. **Téchne**, São Paulo, ano 4, n.24, p.30-33, set./out.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1993). **Guide for precast concrete wall panels – ACI 533R**. Detroit.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2001). **ASTM D-6637-01: Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib test method**. Philadelphia.

ANDRADE, F.P.A. (1994). A Construção de edifícios. In: VARGAS, M. **Contribuições para a história da engenharia no Brasil**. São Paulo: EDUSP. p.31-76.

ANGULO, S.C. (2000). **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ASSEFA, G. et al. (2007). Environmental assessment of building properties-where natural and social sciences meet: the case of EcoEffect. **Building and Environment**, Oxford, v.42, n.3, p.1458–1464, Mar.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA (1980). **A História dos pré-fabricados e sua evolução no Brasil**. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002). **Manual técnico para implementação** - habitação 1.0: bairro saudável, população saudável. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2008). **Paredes de concreto**: coletânea de ativos 2007/2008. Disponível em: <<http://abcp.org.br/solucoesparacidades/conteúdo/?p=400>>. Acesso em: 21 nov. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). **NBR 7251**: Agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro.

_____. (1983). **NBR 7810**: Agregado em estado compactado e seco – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro.

_____. (1985). **NBR 8949**: Paredes de alvenaria estrutural: ensaio à compressão simples. Rio de Janeiro.

_____. (1987a). **NBR 9776**: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro.

_____. (1987b). **NBR7217**: Agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.

_____. (1987c). **NBR7218**: Agregado – determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro.

_____. (1987d). **NBR7219**: Agregado – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro.

_____. (1991). **NBR 7215**: Cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro.

_____. (1994a). **NBR 5739**: Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro.

_____. (1994b). **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro.

_____. (1998a). **NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro.

_____. (1998b). **NM 67:** Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro.

_____. (2001). **NM49:** Agregado miúdo – determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro.

_____. (2002). **NBR 14861:** Laje pré-fabricada – painel alveolar de concreto protendido - requisitos. Rio de Janeiro.

_____. (2003). **NBR 8522:** Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro.

_____. (2004a). **NBR 10004:** Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro.

_____. (2004b). **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro.

_____. (2006). **NBR 9062:** Projeto e execução em estruturas em concreto pré-moldado. Rio de Janeiro.

BARDELLA, P.S.; BARBOSA, D.C.; CAMARINI, G. (2005). Influência da sílica ativa e das condições de cura na absorção capilar e na permeabilidade ao ar do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Olinda. **Anais...** Pernambuco: IBRACON. p.310-325.

BARRETT, J.; RAVETZ, J.; BOND, S. (2006). **Counting consumption:** CO2 emissions, material flows and ecological footprint of the UK by region and devolved country. Godalming. Disponível em: <<http://www.ecologicalbudget.org.uk>>. Acesso em: 10 Apr. 2008.

BARROS, M.M.S.B. (1998). O Processo de produção das alvenarias racionalizadas. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA E GESTÃO DA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS: vedações verticais, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Makron Books. p.36-46.

BARTON, P.; BEGGS, C.B.; SLEIGH, P.A. (2002). Theoretical study of the thermal performance of the termodeck hollow core slab system. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v.22, n.13, p.1485–1499, Sept.

BAYASI, Z.; KAISER, H. (2003). Flexural behavior of composite concrete slabs using carbon fibre laminate decks. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.100, n.4, p.274–279, July.

BEER, F.P.; JOHNSTON JR., E.R. (1995). **Resistência dos materiais**. 3.ed. São Paulo: Makron Books.

BENTUR, A.; COHEN, M.D. (1987). Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in portland cement mortars. **Journal American Ceramic Society**, Easton, v.70, n.10, p.738-743.

BERNSTEIN, H. (1996). Bridging the globe: creating na international climate and chalenges f sustainable design and construction. **Industry and Environment**, Paris, v.19, n.2, p.19-21, abril/juin.

BON, R. (2001). The Role of construction in economic development. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO DA QUALIDADE E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., 2001, Fortaleza. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC/UFC/UNIFOR. CD-ROM.

BOURDEAU, L. (1994). **Quelques grands déterminants de l'évolution future du processus de construction dans les pays occidentaux: une analyse par le Group de Travail W82 du CIB**. Paris: CSTB.

_____. (1999). **CIB agenda 21 on sustainable construction**. Rotterdam: CIB Report .

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. (2000). **Programa tecnologia industrial básica e serviços tecnológicos para inovação e competitividade**. Brasília. Síntese do workshop realizado em 31.10.2000, na sede da ABCP, São Paulo.

_____. (2001). **Necessidades de ações de desenvolvimento tecnológico na produção da construção civil e da construção civil**. Brasília.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (1975). **BS 812**: Testing aggregates: methods for determination of particle size and shape - part 1. London.

BROO, H.; LUNDGREN, K.; ENGSTRÖM, B. (2004). Shear and torsion in prestressed hollow core units: Finite element analyses of full scale tests. **Structural Concrete**, Lausanne, v.8, n.2, p.87-100, June.

BUTTLER, A.M. (2007). **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria Estrutural**. 499p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAIRNS, R.; DI NIRO, G.; DOLARA, E. (1998). The Use of RAC in prefabrication. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM "SUSTAINABLE CONSTRUCTION: use of recycled concrete aggregate", 1998, Londres. **Proceedings...** London: Thomas Telford. p.371-380.

CALMON, J.L. et al. (1998). Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo-cimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO: qualidade no processo construtivo, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: NPC/ECV/CTC/UFSC.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (2003). Disponível em:<<http://www.cbic.org.br>>. Acesso em: 14 jan. 2003.

CAMARGO, A. (1995). Minas de entulho. **Téchne**, São Paulo, ano 3, n.15, p.15-19, mar./abr.

CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S.; CASSA, J.C.S. (2001). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal.

CARPINETTI, L.C.R.; ROSSI, L.H. (1998). **Gerenciamento da qualidade na construção civil**. São Carlos: EESC/USP.

CARVALHO, M.S.; SAURIN, T.A. (1995). **Tópicos sobre flexibilidade como estratégia competitiva na indústria da construção civil**. Porto Alegre: NORIE/UFRGS.

CASTILHO, V.C. (2003). **Otimização de componentes de concreto pré-moldado protendidos mediante algoritmos genéticos**. 283p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (2005). **EN 1168:2005** – Precast concrete products – hollow core slabs. Brussels.

CONSTRUCTION TASK FORCE (1998). **Rethinking construction (Egan Report)**. London: Department of the Environment, Transport and the Regions (DETR).

CORGNATI, S.P.; KINDINIS, A. (2007). Thermal mass activation by hollow core slab coupled with night ventilation to reduce summer cooling loads. **Building and Environment**, Oxford, v.42, n.9, p.3285–3297, Sept.

DAMTOFT, J.S. et al. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.38, n.2, p.115–127, Feb.

DEMANBORO, A.C.; ARGOLLO FERRÃO, A.M.; MARIOTONI, C.A. (2003). As Técnicas de construção e as questões energéticas e ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 3., 2003, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar.

DEMIRBAS, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v.42, n.11, p.1357-1378, July.

DOBBELSTEEN, A.A.J.F.; VAN DEN LINDEN, A.C.; VAN DER RAVESLOOT, C.M. (2002). Defining the reference for environmental performance. In: ANSON, M.; KO, J.M.; LAM, E.S.S. (Ed.). *Advances in building technology*. Oxford: Elsevier Science. p.1509-1516.

DRABÆK, I.; BRINCH-PEDERSEN, M. (2003). **Sustainable development as a business principle in the supply chain: no writing on the wall**. Nordic Partnership discussion paper. Disponível em: <www.infoagro.net/shared/docs/a6/SustDevBusiness.pdf>. Acesso em: 13 Jan. 2009.

EDWARDS, S.; BENNETT, P. (2003). Construction products and life-cycle thinking. **Industry and Environment**, Paris, v.26, n.2/3, p.57-61 Apr./Sep.

EL DEBS, M.K. (2000). **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Projeto Reenge/EESC/USP.

ERLANDSSON, M.; BORG, M. (2003). Generic LCA-methodology for buildings, constructions and operation services – today practice and development needs. **Building and Environment**, Oxford, v.38, n.7, p.919-938, July.

ETXEBERRIA, M. et al. (2004). The Role and influence of recycled aggregate, in “recycled aggregate concrete”. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON THE USE OF RECYCLED MATERIALS IN BUILDINGS AND STRUCTURES, 2004, Barcelona. **Proceedings...** França: Elsevier.

FALCÃO, P. I.; STELLIN JUNIOR, A. (2001). Utilização de finos de serraria do Espírito Santo nas indústrias de construção civil. In: JORNADAS IBEROAMERICANAS SOBRE CARACTERIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, 2001, Madrid. **Ponencias y Comunicaciones...** Madrid: Escuela T.S.I. de Minas de Madrid. p.45-53.

FARAH, M.F.S. (1996). **Processo de trabalho na construção habitacional: tradição e mudança.** São Paulo: ANNABLUME.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAÎNTE (1992). **Guide to good practice: quality assurance of hollow core slab.** London: Seto.

FERREIRA, M.A. et al. (2008). Resistência de lajes alveolares pré-fabricadas ao cisalhamento. **Téchne**, São Paulo, ano 16, n.139.

FONSECA, F.B. (2002). **Desempenho estrutural de paredes de alvenaria de blocos de concreto de agregados reciclados de rejeitos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FORMOSO, C.T. (Coord.). (2002). **Plano estratégico para ciência, tecnologia e inovação na área de tecnologia do ambiente construído com ênfase na construção habitacional.** Porto Alegre: ANTAC.

GEYER, R.T.; RAZUK, F.C. (2002). Utilização de escória de aciaria elétrica na produção de tijolos de solo-cimento-escória. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília, DF. **Anais...** Brasília: UnB. CD-Rom.

GIBBERD, J. (2004). **The Sustainable building assessment tool: assessing how buildings can support sustainability in developing countries.** Disponível em:<<http://www.civils.org.za/bepc/jgibberd.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2009.

GIRHAMMAR, U.A.; PAJARI, M. (2008). Tests and analysis on shear strength of composite slabs of hollow core units and concrete topping. **Construction and Building Materials**, Reigate, v.22, n.8, p.1708–1722, Aug.

GRANDE, F.M. (2003). **Fabricação de tijolos de solo-cimento por prensagem manual com e sem a adição de sílica ativa.** 165p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GUGGEMOS, A.A. (2003). **Environmental Impacts of on-site construction processes: focus on structural frames**. PhD Thesis - Engineering – Civil and Environmental Engineering of the University of California, Berkeley, 2003.

HABITARE PROGRAMA DE TECNOLOGIA DE HABITAÇÃO (2009). **Coordenação modular na construção**. São Paulo: Rede Habitare de Pesquisa 2; FINEP. Folder.

HANAI, J.B. (2005). Fundamentos do concreto protendido: e-book de apoio para o curso de Engenharia Civil. São Carlos: EESC/USP.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. (1992). **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI.

HIBBELER, R.C. (2000). **Resistência dos materiais**. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.

HOLANDA, E.P.T. (2003). **Novas tecnologias construtivas para produção de vedações verticais**: diretrizes para o treinamento da mão-de-obra. 158p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

HOSNY, A. et al. (2006). Strengthening precast-prestressed hollow core slabs to resist negative moments using carbon fibre reinforced polymer strips: an experimental investigation and critical review of Canadian Standards Association S806-02. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v.33, n.8, p.955-967, Aug.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2000). **Censo Demográfico 2000**: características da população e dos domicílios- resultados do universo. Rio de Janeiro.

INDUSTRY AND ENVIRONMENT. (1996). **Construction and environment**: fact and figures, Paris, v.29, n.2. p.2-8, abril/juin.

INFOHAB (2001). **Centro de referência e informação em habitação**. Base de dados referencial e de texto completo. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em 15 jun. 2008.

INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION (1999). **Agenda 21 on sustainable construction**. Rotterdam: CIB Report.

JOHN, V.M. (2000). **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 102p. Tese (Livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

_____. (2001). Aproveitamento de resíduos sólidos como material de construção. In: CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S.; CASSA, J.C.S. **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal.

JOHN, V.M.; ANGULO, S.C. (2004). Desafios de gerenciamento e reciclagem de resíduos da construção civil. **Conjuntura da Construção**, São Paulo, ano 2, n.2, p.10-11.

JOHN, V.M.; KRAAYENBRINK, E.A.; VAN WAMELEN, J. (1996). Upgradeability: na added dimension to performance evaluation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM APPLICATIONS OF THE PERFORMANCE CONCEPT IN BUILDING, 3., 1996, Tel Aviv. **Proceedings...** Rotterdam: CIB.

KANIRAJ, S.R.; HAVANAGI, V.G. (1999). Compressive Strength of cement stabilized fly ash – soil mixtures **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.29, n.5, p.673-677, May.

KAZMIERCZAK, C.S. ET AL. (2001). Utilização de resíduos da indústria coureiro-calçadista no desenvolvimento de um novo material para a construção civil. [S.l.:s.n.]. Relatório final convênio FINEP/UNISINOS.

KILBERT, C. (1994). Establishing principles and models for sustainable construction. In: CIB TG 16 SUSTAINABLE CONSTRUCTION, 1994, Tampa. **Proceedings...** Tampa: [s.n.]. p.3-12.

KRÜGER, P.G.; SOUZA, H.A.; FREITAS, A.M.S. (2002). Painéis pré-moldados de concreto em estruturas metálicas. **FINESTRA Brasil**, São Paulo, n.30, p.105-108.

LEITE, M.B. (2001). **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIBORIO, J.B.L.; MELO, A.B.; SILVA, I.J. (1998). A Influência do teor de adição e do tipo de sílica ativa nas propriedades mecânicas do concreto de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 42./ IBERO AMERICANO CERAMICA, VIDRIOS Y REFRACTÁRIOS, 4., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** [S.l.:s.n.]. CD-Rom.

LIMA, J.A.R.; SILVA, L.F.E. (1998). Utilização e normalização de resíduo de construção reciclado no Brasil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL – GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS E CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL, 2., 1998, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: PUCRS. p.169-171.

LIPPIATT, B. (1998). Building for environmental and economic sustainability (BEES). In: CIB WORLD BUILDING CONGRESS – Construction and the environment, 1998, Gayle. **Proceedings...** Stockholm: CIB.

LÓPEZ-MESA, B. et al. (2009). Comparison of environmental impacts of building structures with in situ cast floors and with precast concrete floors. **Building and Environment**, Oxford, v.44, n.4, p.699–712, Apr.

MALDANER, S.M. (2003). **Procedimento para identificação de custos da nãoqualidade na construção civil**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MATEUS, R. (2004). **Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Minho, 2004.

- MELO, C.E.E. (2004). **Manual Munte de projeto em pré-fabricados de concreto**. São Paulo: Pini.
- MIGLIORE, G.M. (2008). **Dimensionamento e utilização de laje alveolar protendida**. Monografia (Graduação) – Centro universitário da fundação Educacional de Barretos, Barretos, 2008.
- MILLER, G.A.; AZAD, S. (2000). Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. **Construction and Building Materials**, Reigate, v.14, n.2, p.89-97, Mar.
- MIRANDA, L.F.R. (2000). **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 172p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- MONTEDOR, L.C.; PINHEIRO, L.M.; FERREIRA, M.A. (2006). Ensaio de cisalhamento em lajes alveolares. **Caderno de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v.8, n.32, p.41-44.
- MORA, E.P. (2007). Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. **Building and Environment**, Oxford, v.42, n.3, p.1329–1334, Mar.
- NAKAMURA, J. (2006). A Respeito do meio ambiente. **Revista Arquitetura e Urbanismo**, São Paulo, n.142, p.49-50.
- NASCIMENTO, L.C.; ALMEIDA FILHO, N.B.; ZAKON, A. (2000). Cinzas da incineração de lixo: matéria-prima para cerâmicas – resíduos convertidos em compostos inorgânicos podem ser usados em vários produtos. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, p.63-67.
- ÖBERG, M.; DAMTOFT, J.S. (2007). **Concrete buildings in view of the EC energy performance of buildings directive**. Presented at the conference Concrete: construction's sustainable option, Dundee, 2007.
- OIKONOMOU, N.D. (2005). Recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Essex, v.27, n.2, p.315-318, Jan.
- OLIVEIRA, L.A. (2002). **Tecnologia de painéis pré-fabricados arquitetônicos para emprego em fachadas de edifícios**. 175p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- OLIVERI, G.M. (1972). **Prefabricacion: o metaproyecto constructivo**. Barcelona: Gili.
- PAULON, V.A. (1996). Interface entre pasta de cimento e agregado: a influência na durabilidade dos concretos. **Téchne**, São Paulo, n.25, p.29-31, nov./dez.
- PENG, C.; SCORPIO, D.E.; KIBERT, C.J. (1997). Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. **Construction Management and Economics**, London, v.15, n.1, p.49-58.
- PEREIRA, A.C.W. (2005). **Diretrizes para implantação de sistemas construtivos abertos na habitação de interesse social através da modulação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

PERUZZI, A.P. (2007). **Estudo das alternativas de uso de fibra de vidro sem características álcali resistente em elementos construtivos de cimento Portland**. 182p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PINTO, T.P. (1999). **Metodologia para gestão de resíduos sólidos de construção urbana**. 189p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

_____. (2000). Recycling in construction sites: environmental responsibility and cost reduction. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: Theory into practice, 2000, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: CIB. CD-Rom.

RAVETZ, J. (2008). Resource flow analysis for sustainable construction: metrics for an integrated supply chain approach. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: waste and resource management**, London, v.161, n.2, p.51–66, May.

SABBATINI, F.H. (1989). **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos**: formulação e aplicação de uma metodologia. 336p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

_____. (1998). A Industrialização e o processo de produção de vedações: utopia ou elemento de competitividade empresarial. In: SEMINÁRIO TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/PCC.

SABBATINI, F.H.; FRANCO, L. (2001). **Notas de aula da disciplina de tecnologia de produção de vedações verticais** – TG 04 e PCC2435. São Paulo: EPUSP. Disponível em: <<http://www.pcc.usp.br/Graduação/PCC2435/pdf/PCC2435-aula18a.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

SACOMANO, J.B. (1998). **Sistemas de administração da produção e a construção Civil**. São Paulo: EESC/USP. p.37-77.

SÃO PAULO (Estado). (1970). **Decreto nº 12.342, de 27 de setembro de 1978, aprova o regulamento a que se refere o art. 22 do decreto-lei nº 211 de 30 de março de 1970, que dispõe de normas de promoção, preservação e recuperação da saúde no campo de competência da Secretaria de Estado da Saúde**. Bauru: EDIPRO, Bauru.

SAVASTANO JUNIOR, H.; WARDEN, P.G; COUTTS, R.S P. (2000). Brazilian waste fibres as reinforcement for cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, Essex, v.22, n.5, p.379-384, Oct.

_____. (2003). Potential of alternative fibre-cements as building materials for developing areas. **Cement and Concrete Composites**, Essex, v.25, n.6, p.585-592, Aug.

SAVASTANO JUNIOR, H. et al. (1999). Plant fibre reinforced components for roofing. **Construction and Building Materials**, Reigate, v.13, n.8, p.433-438, Dec.

SCHULTZ, P. (2005). **Painéis sanduíche constituídos por cimento reforçado com fibras (CRF) e compósitos poliméricos**: Pesquisa e desenvolvimento preliminar. 126p.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SERRADOR, M.E. (2008). **Sustentabilidade em arquitetura: referências pra projeto.** 267p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SHEN, L.; TAM, V.W.; LI, C. (2009). Benefit analysis on replacing *in situ* concreting with precast slabs for temporary construction works in pursuing sustainable construction practice. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.53, n.3, p.145–148, Jan.

SILVA, A.A. (2003). **Módulos celulares pré-fabricados de concreto protendido para construção de lajes nervuradas.** 166p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SILVA, I.J. (2000). **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho com adição de sílica ativa:** propriedades mecânicas, durabilidade e características da microestrutura. 279p. Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais (IQSC/EESC/IFSC), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SILVA, M.A.C. (2000). **Necessidades de ações de desenvolvimento tecnológico na produção da construção civil e da construção civil.** Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia.

SILVA, V.G. (2003). **Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros:** diretrizes e base metodológica. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, V.G.; SILVA, M.G.; AGOPYAN, V. (2003). Avaliação de edifícios no Brasil, da avaliação ambiental para a avaliação da sustentabilidade. **Ambiente Construído**, São Paulo, v.3, n.3, p.7-18.

SJÖSTRÖM, C. (1992). Durability and sustainable use of building materials. In: LLEWELLYN, J.W.; DAVIES, H. (Ed.). **Sustainable use of materials.** London: BRE/RILEM.

TAM, V.W.Y.; GAO, X.F.; TAM, C.M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.35, n.6, p.1195-1203, June.

TAVARES, D.H. (2006). **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de FRP.** 118p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TRUSTY, W. (2000). Introducing na assessment tool classification system. **Advanced Building Newsletter**, Athena, v.1, n.2, p.18, July.

VARGAS, M. (1994). Indústria da construção e a tecnologia no Brasil. In: MOTOYAMA, S. **Tecnologia e industrialização no Brasil: uma perspectiva histórica**. São Paulo: UNESP. p.29-36.

VÁSQUEZ, E.; BARRA, M. (2000). Recycling of aggregates in the construction industry. In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: Theory into practice, 2000, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: CIB. CD-Rom.

WADDELL, H. (2008). Sustainable construction and UK legislation and policy. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: management, procurement and law**, London, v.161, n.3, p.127–132, Aug.

XIE, J.Z. (2009). Macroscopic elastic constitutive relationship of cast-in-place hollow-core slabs. **Journal Of Structural Engineering**, New York, v.135, n.9, p.1040-1047, Sept.

YUBA, A.N. (2005). **Análise da pluridimensionalidade da sustentabilidade da cadeia produtiva de componentes de madeira de plantio florestais**. 211p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ZORDAN, S.E. (1997). **A Utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. 140p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

APÊNDICE A – ESTUDOS DE SEÇÕES DO PAINÉL ALVEOLAR

ALVÉOLO HEXAGONAL

PAINEL E 14 - ALV. HEXAGONAL					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0826	0,0426	0,04	0,0426	0,005	48,4

PAINEL E 11,5 - ALV. HEXAGONAL					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0679	0,0363	0,0316	0,0363	0,005	46,5

ALVÉOLO ELÍPTICO 01

PAINEL E 14 - ALV. ELÍPTICO 01					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0826	0,0388	0,0438	0,0388	0,0051	53,0

PAINEL E 11,5 - ALV. ELÍPTICO 01					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0679	0,0323	0,0356	0,0323	0,0051	52,4

ALVÉOLO ELÍPTICO 02

PAINEL E 14 - ALV. ELÍPTICO 02					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0826	0,045	0,0376	0,045	0,0055	45,5

PAINEL E 11,5 - ALV. ELÍPTICO 02					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0679	0,0379	0,03	0,0379	0,0051	44,2

ALVÉOLO CIRCULAR

PAINEL E 14 - ALV. CIRCULAR					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0826	0,0511	0,0315	0,0511	0,005	38,1

PAINEL E 11,5 - ALV. CIRCULAR					
Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. Tetrapack	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0679	0,0377	0,0302	0,0377	0,006	44,5

TÍTULO DO PROJETO: PAINEL AUTO-PORTANTE COM ARMADURA NÃO METÁLICA		FOLHA: 01/02		
OBJETIVO: PATENTE - PROJETO SOMHABIS - FINEP				
PROJETO: ESTUDO DE SEÇÃO		ESCALA: 1:10	VERSÃO: 01	DATA: OUT/2007
PROPRIEDADE: OSNY PELEGRINO FERREIRA - FERNANDO MAZZEO GRANDE			REVISÃO / APROVAÇÃO: 01	VISTO:

ARQ. FERNANDO MAZZEO GRANDE
CREA SP : 5080477021

PAINEL E 8 - ALV. ELÍPTICO PROTÓTIPO

Área Bruta	Seção Concreto	Seção Vazio	V. Concreto	V. FIBRA	Vazio
m ²	m ²	m ²	m ³ / m	m ³ / m	%
0,0444	0,0294	0,015	0,0294	0,0031	33,8

SEÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO COM
CHAPA METÁLICA E MANTA DE FIBRA DE VIDRO

	TÍTULO DO PROJETO:	PAINEL AUTO-PORTANTE COM ARMADURA NÃO METÁLICA			FOLHA:	02/02
	OBJETIVO:	PATENTE - PROJETO SOMHABIS - FINEP				
PROJETO:	ESTUDO DE SEÇÃO		ESCALA:	1:10	VERSÃO:	01
PROPRIEDADE:	OSNY PELEGRINO FERREIRA - FERNANDO MAZZEO GRANDE				REVISÃO / APROVAÇÃO:	01
					DATA:	ABR/2008
					VISTO:	

ARQ. FERNANDO MAZZEO GRANDE
CREA SP : 5060477021