

**ALEXANDRE VARGAS**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES PRÉ-FABRICADAS  
UTILIZANDO EMBALAGENS RECICLÁVEIS COMO  
ELEMENTOS DE ENCHIMENTO**

Dissertação de Mestrado – DM  
apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Ciência e  
Engenharia de Materiais da  
Universidade do Extremo Sul  
Catarinense - UNESC, como  
requisito à obtenção do título de  
Mestre em Ciência e Engenharia de  
Materiais.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Fernando  
Pelisser

Co-Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Marcio  
Roberto da Rocha

**CRICIÚMA  
2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

V297a Vargas, Alexandre.

Análise experimental de lajes pré-fabricadas utilizando embalagens recicláveis como elementos de enchimento / Alexandre Vargas; orientador: Fernando Pelisser, co-orientador: Márcio Roberto da Rocha. – Criciúma,SC, Ed. do Autor, 2013. 71 p : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2013.

1. Lajes de concreto. 2. Lajes pré-moldadas. 3. Reaproveitamento (sobras, refugos, etc.). I. Título.

CDD. 22ª ed. 624.1834

## PARECER

ALEXANDRE VARGAS

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LAJES PRÉ-FABRICADAS  
UTILIZANDO EMBALAGENS RECICLÁVEIS COMO  
ELEMENTOS DE ENCHIMENTO

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 26 de fevereiro de 2013.



**Prof. Dr. Elídio Angioletto**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto**

Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização dessa pesquisa.

Meus agradecimentos especiais ao professor Dr. Fernando Pelisser, meu orientador, pela dedicação e empenho na condução da pesquisa.

Ao professor Msc. Bruno do Valle Silva, pela inestimável contribuição nos ensaios e discussões.

Ao Eng. Civil Marcelo Dal Pont Silvério por ter aceitado o desafio do pioneirismo no desenvolvimento dessa linha de pesquisa na UNESC quando acadêmico.

Aos acadêmicos, Mateus de Assunção Hoffmann e Filipe Machado Vargas, pela participação direta na construção dos protótipos e ensaios de laboratório.

Ao acadêmico Bruno da Silva Costa, pelo esmero nos desenhos e auxílio na pesquisa.

Ao professor Msc. Luciano Antunes, pelo companheirismo e disposição permanente em contribuir.

A UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense pelo apoio.

E a todos os professores e colegas do Programa de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais (PPGCEM) pelo convívio, amizade construída e troca de conhecimento ao longo do curso.



## RESUMO

Lajes pré-moldadas comuns unidirecionais são elementos estruturais compostos por vigotas de concreto pré-fabricadas, intercaladas com elementos de enchimento e complementadas por uma capa de concreto moldada “*in loco*”. Os esforços de flexão são absorvidos exclusivamente pelas vigotas, podendo, portanto o material de enchimento ser de qualquer natureza desde que atenda aos esforços gerados na montagem e na concretagem da capa de compressão. Dentro desse contexto, embalagens já utilizadas e descartadas pode ser uma alternativa. Nesse trabalho foram avaliadas experimentalmente quatro tipologias de lajes utilizando diferentes materiais descartados como enchimento: tavela cerâmica como referência, garrafas de PET, embalagens cartonadas e latas de alumínio. Foram confeccionados doze protótipos, com quatro vigotas cada com comprimento total de três metros. As larguras foram definidas pelas dimensões dos elementos de enchimento. Todas as amostras foram submetidas a ensaio de flexão em quatro pontos, utilizando LVDT (*Linear Variable Differential Transforme*), *straingages* e sistema de aquisição de dados *QuantumX* (marca *HBM*) com interface com o software *CatmanEasy*. Foram medidas as deformações específicas nas faces superior e inferior das vigotas; as cargas relacionadas aos deslocamentos L/250 (Norma NBR 6118:2007); L/500 (Norma europeia BS EN 15037-1/08) e na ruptura, além da realização de um estudo da viabilidade econômica para a utilização dos materiais alternativos. Os resultados indicaram que a fabricação de lajes pré-fabricadas com componentes de enchimento usados e descartados podem substituir os blocos cerâmicos convencionais tanto no aspecto técnico como econômico. Uma das vantagens verificadas foi o peso próprio, que mostrou uma redução média de até 20%, em relação às lajes de referência com tavelas cerâmicas. A capacidade de carga na ruptura é superior nas lajes que utilizaram as embalagens recicláveis. O custo ficou discretamente inferior com duas das embalagens utilizadas.

*Palavras-chave: Laje pré-moldada, reciclagem, resíduo sólido.*



## ABSTRACT

Unidirectional precast slabs are structural elements formed by prefabricated concrete joists interspersed with filler elements and complemented by a layer of concrete casted "in situ". The bending stresses are absorbed solely by the joists and, therefore, the filler can be of any material provided that supports the stresses generated in the assembly and concreting of the compression layer. Within this context, used and discarded packaging can be an alternative for slab fillers. In this work, four typologies of slabs using discarded materials as filler and a reference were experimentally evaluated: ceramic tiles as reference, PET bottles, cardboard boxes and aluminum cans. Twelve prototypes were fabricated with four beams each with a total length of three meters. The widths were defined by the dimensions of the filling elements. All samples were subjected to bending test at four points using LVDT (Linear Variable Differential Transform), straingages and data acquisition system (QuantumX, HBM) with software interface (CatmanEasy). The specific deformations were measured in upper and lower faces of the joists. The loads were related to strains at L/250 (Brazilian standard NBR 6118:2007), L/500 (European standard BS EN 15073-1/08) and at break. Also, a study of the economic feasibility for the use of the alternative materials was performed. The results showed that the production of prefabricated slabs using discarded filling elements can replace the conventional ceramic blocks regarding technical and economical aspects. The slabs using discarded elements showed 20% weight reduction regarding the reference slabs using ceramic tiles. Also, the breaking load for slabs using discarded elements was higher. Finally, the cost was slightly lower for slabs made with two of the packagings.

*Keywords: precast slab, recycling, solid residues.*



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (a), (b), (c), (d), (e), (f) – Vista de diferentes tipologias de laje, moldadas “in loco” e pré-fabricadas.....	24
Figura 2 - Laje com vigotas pré-fabricadas de concreto armado e detalhe da seção transversal.....	25
Figura 3 - Vigotas pré-fabricadas de concreto armado.....	26
Figura 4 - Materiais de enchimento usuais em lajes pré-fabricadas unidirecionais (EPS (a) e tavela cerâmica (b)). .....	27
Figura 5 - Concretagem da capa de compressão de uma laje pré-moldada unidirecional.....	28
Figura 6 - Vista da armadura de combate à flexão da vigota. ....	29
Figura 7 - Montagem da armadura de distribuição sobre a laje. ....	29
Figura 8 – Depósito de resíduos sólidos.....	30
Figura 9 - Embalagem cartonada e suas diferentes camadas.....	34
Figura 10 - Fases inicial e final do processamento em fábricas de papel utilizando o equipamento “hidrapulper”. ....	35
Figura 11 - Produtos produzidos a partir da reciclagem de embalagens cartonadas.....	36
Figura 12 - Embalagens produzidas com PET.....	36
Figura 13 - Embalagens de alumínio para bebidas.....	37
Figura 14 - Custo por metro quadrado de lajes nervuradas.....	40
Figura 15 - Geometria da tavela cerâmica utilizada. ....	41
Figura 16 - Geometria da embalagem cartonada.....	42
Figura 17 - (a) e (b) - Sequência de montagem das latas de alumínio para aplicação como elementos de enchimento nos protótipos de lajes.....	43
Figura 18 - (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h) - Sequência de montagem das garrafas de PET para aplicação como elementos de enchimento nos protótipos de lajes.....	44
Figura 19 - Vigota pré-moldada de concreto armado.....	45
Figura 20 - Armazenamento dos 3 tipos de embalagens empregadas... ..	47
Figura 21 - Montagem dos protótipos: tavela cerâmica (a), embalagens cartonadas (b), latas de alumínio (c), embalagens de PET (d). ....	47
Figura 22 - (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Concretagem e cura da capa de compressão dos protótipos das lajes utilizando concreto usinado.....	48
Figura 23 - Vista inferior dos protótipos finalizados: tavela cerâmica (a), embalagem cartonada (b), lata (c) e garrafas de PET (d). ....	49
Figura 24 - (a) Empilhadeira utilizada para posicionar os protótipos sobre a balança e (b) pesagem dos protótipos de lajes. ....	50
Figura 25 - Posicionamento dos sensores na laje de ensaio. ....	51

Figura 26 - Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos realizado nos protótipos de lajes, mostrando a vista lateral e um corte esquemático..	52
Figura 27 - Densidade dos protótipos de lajes. ....	53
Figura 28 – Média dos deslocamentos dos protótipos das lajes.....	56
Figura 29 - Carga de ruptura média para cada tipo de protótipo de laje. .....	57
Figura 30 - Esquema de distribuição de carregamento. ....	60
Figura 31 - Deformação medida com <i>strainingaige</i> na capa de compressão (C) e na vigota do centro submetida à tração (T) durante o ensaio de flexão. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Espessura mínima da capa de compressão .....	28
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do concreto utilizado na capa de compressão .....	46
Tabela 3 - Resultados da caracterização dos protótipos de lajes. ....	54
Tabela 4 - Resumo dos resultados dos deslocamentos em função do carregamento e as cargas de ruptura.....	55
Tabela 5 - Análise estatística ANOVA considerando o tipo de laje.....	57
Tabela 6 - Teste de Duncan considerando o tipo de laje.....	57
Tabela 7 - Resultados do ensaio de flexão nas vigotas internas. ....	59
Tabela 8 - Resumo dos quantitativos e valores gastos na confecção dos protótipos.....	63



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
I-Parque	Parque Científico e Tecnológico da UNESC
LEE	Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC
UNESC	Universidade do Extremo Sul Catarinense



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	19
2 OBJETIVOS .....	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 LAJES .....	23
3.1.1 Lajes de vigotas convencionais pré-fabricadas unidirecionais.....	24
3.1.1.1 Vigotas pré-fabricadas.....	25
3.1.1.2 Elementos de enchimento.....	26
3.1.1.3 Capa de compressão .....	27
3.1.1.4 Armadura longitudinal .....	28
3.1.1.5 Armadura de distribuição .....	29
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS .....	29
3.2.1 Plano nacional de resíduos sólidos.....	32
3.2.2 Embalagens cartonadas .....	33
3.2.3 Embalagens de politereftalato de etileno (PET).....	36
3.2.4 Latas de alumínio .....	37
3.3 LAJES PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO PRODUZIDAS COM MATERIAIS RECICLADOS .....	38
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	41
4.1 MATERIAIS .....	41
4.1.1 Tabelas cerâmicas .....	41
4.1.2 Embalagens cartonadas .....	41
4.1.3 Latas de alumínio .....	42
4.1.4 Garrafas de PET .....	43
4.1.5 Vigotas pré-moldadas.....	45
4.1.6 Concreto fresco .....	46
4.1.7 Armadura de distribuição .....	46
4.2 MÉTODOS .....	47
4.2.1 Fabricação dos protótipos.....	47
4.2.2 Determinação da Densidade.....	49
4.2.3 Ensaio de flexão em 4 pontos.....	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1 DENSIDADE.....	53
5.2 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	54
5.3 ANÁLISE ECONÔMICA.....	62
6 CONCLUSÃO .....	65



## 1 INTRODUÇÃO

A coleta seletiva de resíduos sólidos, classificados pela Norma Brasileira NBR 10004/04 como classe II B - Inertes, ainda apresenta números pouco expressivos na região sul de Santa Catarina. Segundo dados da Fundação do Meio Ambiente de Criciúma – FAMCRI (2012), cerca de 30% das habitações praticam a separação e/ou são atendidas pela municipalidade para fomentar essa ação. Além da visível falta de conscientização ambiental, esse fato transforma o destino final desse material num dos grandes problemas da vida moderna. É comum, infelizmente, observar embalagens deixadas em vias públicas ou terrenos baldios sem qualquer zelo. A prática inadequada, de descarte sem critério, tem contribuído para o aumento das inundações, em função da obstrução das vias de escoamento das águas.

Diversas pesquisas sobre o aproveitamento de resíduos sólidos como material alternativo para construção civil têm sido desenvolvidas. Kitsutaka e Uchida (2010) apresentam um estudo sobre o concreto leve multifuncional, utilizando resíduos de garrafas de PET; Rebeizet al.(1997) também estudaram o concreto utilizando resina de poliéster proveniente do processamento de garrafas de PET. A empresa de pré-moldados SALEMA – Lajes pré-fabricadas, publicou um estudo da chamada “laje ecológica”, onde apresenta uma proposta de utilização de garrafas de PET embaladas, associadas ou não a outros materiais como o EPS ou blocos cerâmicos, como material de enchimento de lajes treliçadas unidirecionais. Silvério (2009) iniciou uma pesquisa, não instrumentada, sobre a utilização de diferentes embalagens em substituição a tabelas cerâmicas comumente adotadas. No entanto, a utilização de diferentes tipos de embalagens, destinadas à reciclagem, como material de enchimento em lajes pré-fabricadas, ainda é um tema pouco explorado, principalmente na literatura internacional.

Na região sul de Santa Catarina, é prática corrente a utilização de lajes pré-fabricadas convencionais de concreto armado que adotam tábua cerâmica como material de enchimento. Esse material de enchimento é produzido a partir de argila, que é um recurso não renovável e que tem trazido sérios problemas ambientais para a região.

Nas lajes pré-moldadas convencionais unidirecionais, atuam como elemento resistente aos esforços de flexão apenas as vigotas de concreto armado podendo, portanto, o material de enchimento ser de qualquer natureza, desde que atenda aos esforços oriundos da concretagem da capa de compressão (camada de concreto fresco aplicada na parte superior da laje). Com base nessa premissa, as

embalagens descartadas sem destinação adequada podem ser utilizadas para substituir as telhas cerâmicas, de forma simples e eficiente.

Lajes pré-fabricadas utilizando elementos de enchimento leves no lugar dos componentes cerâmicos (telhas) podem ser utilizadas, desde que comprovada a resistência mecânica compatível com as lajes convencionais, como lajes de cobertura e piso, no teto e contrapiso respectivamente, em habitações de baixo custo e de interesse social; contribuindo, assim, para melhoria da eficiência do sistema construtivo. Complementarmente, diante da possibilidade de reutilização das embalagens nas proximidades do local onde são descartadas, comunidades podem se organizar na coleta e armazenamento, objetivando a produção de lajes pré-fabricadas para comercialização, obtendo economia, geração de riquezas, além de contribuir para a destinação sustentável de resíduos.

Este trabalho se propõe a avaliar experimentalmente a substituição das telhas cerâmicas, utilizadas em lajes pré-moldadas comuns unidirecionais, por embalagens cartonadas, latas de alumínio e garrafas de PET. Além da análise da viabilidade técnica, será realizada uma análise econômica considerando os materiais constituintes.

## 2 OBJETIVOS

Avaliar experimentalmente a viabilidade técnica e econômica da substituição de componentes cerâmicos por embalagens cartonadas, garrafas de PET e latas de alumínio descartadas, na produção de lajes pré-moldadas convencionais unidirecionais de concreto.

Os **objetivos específicos** desta pesquisa são:

- Selecionar embalagens disponíveis na região de Criciúma/SC e desenvolver técnicas de manufatura que permitam a sua aplicação como material de enchimento em lajes pré-moldadas;
- Avaliar o comportamento mecânico das diferentes tipologias de lajes, através do ensaio instrumentado de flexão em quatro pontos, considerando os materiais de enchimento empregados, avaliando dimensões, peso próprio, densidade e custo;
- Analisar o consumo de materiais para cada tipologia, sua densidade e a viabilidade econômica para produção;
- Verificar a possibilidade de utilização de embalagens reutilizáveis de PET, cartonadas (tetra pak) e latas de alumínio para fabricação de lajes de concreto;
- Incentivar e contribuir para viabilizar a gestão regionalizada dos resíduos sólidos;
- Contribuir para o desenvolvimento sustentável da indústria da construção civil, através da redução do consumo de materiais não renováveis, reutilização de materiais descartáveis e através do desenvolvimento de novos componentes de baixo custo para habitações de interesse social.



## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 LAJES

As lajes são elementos bidimensionais planos, cuja espessura  $h$  é bem inferior às outras duas dimensões ( $l_x$ ,  $l_y$ ) e que são solicitadas, predominantemente, por cargas perpendiculares ao seu plano. São os elementos estruturais que têm a função básica de receber as cargas de utilização das edificações, aplicadas nos pisos, e transmiti-las às vigas ou pilares sendo a edificação destinada a qualquer uso, ou seja, a laje deverá resistir tanto aos pequenos esforços (pessoas em uma sala) como grandes esforços (fábricas com máquinas pesadas). Além dessas funções, “as lajes também servem para distribuir as cargas horizontais entre os elementos estruturais de contraventamento, além de funcionarem como mesa de compressão nas vigas T” (ARAUJO, 2003).

Quanto ao método de execução as lajes podem ser classificadas em: moldadas “in loco” e pré-fabricadas. As primeiras são aquelas totalmente moldadas na posição em que o elemento foi projetado. As pré-fabricadas, por outro lado, são aquelas que são constituídas por partes ou na totalidade de elementos moldados fora da posição e para lá são transportados e montados.

Diversos são os tipos de laje conhecidas. Dentre essas podem ser citadas: lajes maciças de concreto armado convencional, lajes lisas e cogumelos (que se apoiam diretamente em pilares, com ou sem capitéis), lajes mistas, lajes nervuradas, lajes de fundação (radiers), lajes de vigotas pré-fabricadas (convencionais ou treliçadas), dentre outras.

A Figura 1 apresenta alguns tipos usuais de lajes. Na sequência: (a) laje nervurada com forma recuperável, (b) laje nervurada com blocos cerâmicos como material de enchimento, (c) laje nervurada com EPS como material de enchimento, (d) laje maciça, (e) laje pré-fabricada com tábua cerâmica como material de enchimento e (f) laje pré-fabricada com EPS como material de enchimento.

Figura 1 - (a), (b), (c), (d), (e), (f) – Vista de diferentes tipologias de laje, moldadas “in loco” e pré-fabricadas.



Fonte: Dados do pesquisador.

### 3.1.1 Lajes de vigotas convencionais pré-fabricadas unidirecionais

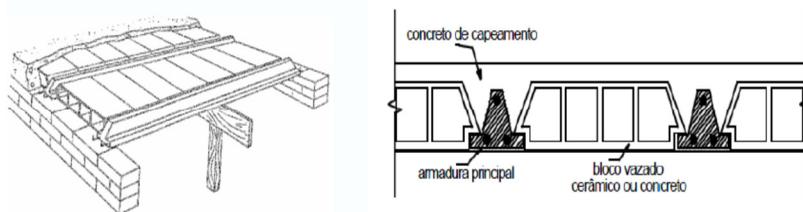
A NBR 14859 Parte 1 de maio de 2002, define laje pré-fabricada unidirecional como: “Laje de seção final maciça ou nervurada, constituída por nervuras principais longitudinais, dispostas em uma única direção”.

“Essas lajes são formadas por elementos pré-moldados chamados de vigotas intercaladas normalmente por componentes cerâmicos (denominados de lajotas) e por uma “capa de concreto” moldada no local “(CARVALHO et al., 2001).

“As lajes pré-moldadas devem, em princípio, vencer o menor dos dois vãos do espaço. [...] o dimensionamento deve sempre partir da seguinte premissa: elas têm de ficar bi-apoiadas.” (BOTELHO et al., 2004).

Na Figura 2 pode ser observado o esquema de uma laje pré-fabricada com vigotas convencionais. É apresentada uma vista da montagem do elemento estrutural e uma seção transversal com seus componentes.

Figura 2 - Laje com vigotas pré-fabricadas de concreto armado e detalhe da seção transversal.



Fonte: Carvalho et al. (2005).

Os itens a seguir (3.1.1.1 a 3.1.1.5), foram construídos a partir das prescrições normativas da NBR 14859 Parte 1 de 2002 e abordam os elementos constituintes das lajes pré-fabricadas de vigotas unidirecionais. São descritas as definições e os requisitos gerais estabelecidos.

### 3.1.1.1 Vigotas pré-fabricadas

“São constituídas por concreto estrutural, executadas industrialmente fora do local de utilização definitivo da estrutura, ou mesmo em canteiros de obra sob rigorosas condições de controle de qualidade (Figura 3). Englobam total ou parcialmente a armadura inferior de tração, integrando parcialmente a seção de concreto da nervura longitudinal. Podem ser dos tipos:

a) de concreto armado (VC): com seção de concreto usualmente formando um "T" invertido, com armadura passiva totalmente englobada pelo concreto da vigota; utilizadas para compor as lajes de concreto armado (LC); b) de concreto protendido (VP): com seção de concreto usualmente formando um "T" invertido, com armadura ativa pré-tensionada totalmente englobada pelo concreto da vigota; utilizadas para compor as lajes de concreto protendido (LP); c) treliçadas (VT): com seção de concreto formando uma placa, com armadura treliçada (conforme NBR 14862), parcialmente englobada pelo concreto da vigota. Quando necessário, deverá ser complementada com armadura passiva inferior de combate à flexão. “As vigotas devem ter uma largura mínima tal que permita, quando montadas em conjunto com os elementos de enchimento, a execução das nervuras de concreto complementar com largura mínima equivalente de 4,0 cm atendendo o disposto na NBR 6118.”

Figura 3 - Vigotas pré-fabricadas de concreto armado



Fonte: Dados do pesquisador.

### 3.1.1.2 Elementos de enchimento

São componentes pré-fabricados com materiais inertes diversos, maciços ou vazados, intercalados entre as vigotas, em geral com a função de reduzir o volume de concreto, o peso próprio da laje e servir como fôrma para o concreto complementar. São desconsiderados como colaboradores nos cálculos de resistência e rigidez da laje. Devem ainda ter resistência suficiente para suportar esforços de trabalho durante a montagem e concretagem da laje. Dentre os materiais de enchimentos

mais utilizados podemos citar: blocos cerâmicos, EPS, concreto, concreto celular dentre outros. A Figura 4 ilustra dois desses elementos de enchimento: EPS e bloco cerâmico (tabela).

A face inferior deve ser plana e as laterais devem apresentar abas de encaixe para apoio nas vigotas, bem como estar isentas de partes quebradas e trincas que comprometam o seu desempenho ou que permitam a fuga do concreto complementar (capa e nervuras).

Figura 4 - Materiais de enchimento usuais em lajes pré-fabricadas unidirecionais (EPS (a) e tabela cerâmica (b)).



Fonte: Dados do pesquisador.

### 3.1.1.3 Capa de compressão

Capa de compressão é a camada de concreto moldada no local, sobre as vigotas e o material de enchimento (Figura 5). Deve ser considerada como parte resistente se sua espessura for no mínimo igual a 3,0 cm. No caso da existência de tubulações, a espessura mínima da capa de compressão acima destas deve ser de no mínimo 2,0 cm, complementada quando necessário, com armadura adequada à perda da seção resistente atendendo ao prescrito na NBR 9062, quanto aos cuidados com a execução. A NBR 14859-1: 2002 determina as espessuras mínimas da capa resistente para as alturas totais das lajes. Esses valores são apresentados na Tabela 1.

Qualquer altura total de lajes pré-fabricadas pode ser utilizada, mediante acordo prévio e expresso entre fornecedor e comprador, desde que atendidas todas as demais disposições desta parte da NBR 14859-1.

Figura 5 - Concretagem da capa de compressão de uma laje pré-moldada unidirecional.



Fonte: Dados do pesquisador.

Tabela 1 - Espessura mínima da capa de compressão

Altura total da laje (cm)	Espessura mínima da capa de compressão (cm)
10	3,0
11	3,0
12	4,0
13	4,0
14	4,0
15	4,0
16	4,0

Fonte: NBR 14859-1: 2002.

#### 3.1.1.4 Armadura longitudinal

A armadura longitudinal deve ser dimensionada para os esforços solicitantes e distribuída uniformemente pelas vigotas, sendo que pelo menos 50% da seção da armadura deve ser prolongada até os apoios, obedecendo ao disposto na NBR 6118:2007, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Vista da armadura de combate à flexão da vigota.



Fonte: Dados do pesquisador.

### 3.1.1.5 Armadura de distribuição

Sobre a laje, na capa de compressão, deverá ser disposta uma armadura de distribuição com seção de no mínimo  $0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$  para aços CA 25 e de  $0,6 \text{ cm}^2/\text{m}$  para os aços CA 50 e CA 60, contendo pelo menos três barras por metro (Figura 7).

Figura 7 - Montagem da armadura de distribuição sobre a laje.



Fonte: Dados do pesquisador.

## 3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, de serviços de saúde, comercial, agrícola, e de serviços de varrição (Figura 8). Consideram-se também resíduos sólidos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como

determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.(NBR 10.004/2004).

Figura 8 – Depósito de resíduos sólidos.



Fonte:<http://www.novoeste.com/index.php?page=regionais&op=readNews&id=1223&title=Gestao-de-residuos-solidos-um-desafio-para-os-novos-prefeitos> visitada em 12/12/2012.

Os resíduos sólidos são classificados em:

- a) resíduos classe I - Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não-perigosos;
  - resíduos classe II A – Não-inertes;
  - resíduos classe II B – Inertes.

**Os resíduos classe I** são aqueles que apresentam a característica de periculosidade que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. São classificados segundo: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade quando a amostra ou extrato lixiviado, obtidos segundo os procedimentos descritos nas normas NBR 10.005 (ABNT, 2004b) e NBR 10.007

(ABNT, 2004d) apresentarem as propriedades equivalentes às descritas na norma NBR 10.004 (ABNT, 2004a).

**Os resíduos classe II A** são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I ou classe II B, nos termos da NBR 10.004 (ABNT, 2004a). Podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

**Os resíduos classe II B** são quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004d), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada e deionizada, à temperatura ambiente conforme a NBR 10.006 (ABNT, 2004c), não apresentarem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Schalch (1992) classifica os resíduos sólidos pela fonte de geração. Assim tem-se:

**Resíduos urbanos:** considerado o lixo produzido nas residências; do comércio, proveniente de estabelecimentos como escritórios, lojas e hotéis; os de varrição e de serviços, como feiras livres, capinação e poda.

**Resíduos industriais** (tóxicos e perigosos): são aqueles gerados pelas indústrias de processamento.

**Resíduos de serviços de saúde:** São definidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária por meio da RDC306/2004, e pela Resolução CONAMA 358/2005 como aqueles resíduos gerados em qualquer serviço prestador de assistências médicas, sanitárias ou estabelecimentos congêneres, provenientes de farmácias, hospitais, unidades ambulatoriais de saúde, clínicas médicas e veterinárias, consultórios médicos e odontológicos, laboratórios de análises clínicas e patologias, instituições de ensino e pesquisa médica, bancos de sangue, necrotérios, funerárias, centro de controle de zoonoses e outros similares.

**Resíduos da construção civil:** São definidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da resolução CONAMA 307/2002, como aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, tintas, madeiras e compensados, pavimento asfáltico, etc. São chamados comumente de entulhos de obras.

**Resíduos agrícolas:** Correspondem aos resíduos das atividades agrícolas e pecuárias, como embalagens de adubos e defensivos

agrícolas, ração, restos de colheita e esterco animal. A maior preocupação no momento está voltada para as embalagens de agroquímicos, os quais são alvos de Normas e Legislação específica, como NBR13968/97, NBR14719/01 e NBR14935/03.

**Resíduos radioativos (lixo atômico):** são os resíduos provenientes do aproveitamento dos combustíveis nucleares. Seu gerenciamento é de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN.

### 3.2.1 Plano nacional de resíduos sólidos

Em setembro de 2011, o governo federal disponibilizou uma versão preliminar para consulta pública do Plano Nacional de Resíduos Sólidos que contemplará os diversos tipos de resíduos gerados, alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, bem como metas para diferentes cenários, programas, projetos e ações correspondentes. Na introdução do documento, é apresentado o conteúdo mínimo a ser contemplado pelo plano: “O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, conforme previsto na Lei 12.305/2010 tem vigência por prazo indeterminado e horizonte de 20 (vinte) anos, com atualização a cada 04 (quatro) anos e contemplará o conteúdo mínimo conforme segue: **I - diagnóstico da situação atual dos resíduos sólidos; II - proposição de cenários**, incluindo tendências internacionais e macroeconômicas; **III - metas de redução, reutilização, reciclagem**, entre outras, com vistas a reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada; **IV - metas para o aproveitamento energético** dos gases gerados nas unidades de disposição final de resíduos sólidos; **V - metas para a eliminação e recuperação de lixões**, associadas à inclusão social e à emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; **VI - programas, projetos e ações** para o atendimento das metas previstas; **VII - normas e condicionantes técnicas para o acesso a recursos da União**, para a obtenção de seu aval ou para o acesso a recursos administrados, direta ou indiretamente, por entidade federal, quando destinados à ações e programas de interesse dos resíduos sólidos; **VIII - medidas para incentivar e viabilizar a gestão regionalizada** dos resíduos sólidos; **IX - diretrizes para o planejamento** e demais atividades de gestão de resíduos sólidos das regiões integradas de desenvolvimento instituídas por lei complementar, bem como para as áreas de especial interesse turístico; **X - normas e**

**diretrizes para a disposição final de rejeitos** e, quando couber, de resíduos; **XI - meios a serem utilizados para o controle e a fiscalização**, no âmbito nacional, de sua implementação e operacionalização, assegurado o controle social.”

Com vistas ao atendimento dessas diretrizes, no âmbito regional, a Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), através do IParque, assinou convênio no mês de dezembro de 2012, com seis municípios da região sul de Santa Catarina para desenvolver o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos para o Cirsures (Consórcio Intermunicipal de Resíduos da Região Sul), formado pelos municípios de Cocal do Sul, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Orleans, Treviso e Urussanga. O Plano, de duração de oito meses, consiste em reduzir o volume de resíduos sólidos (lixo) dos municípios. Os seis municípios juntos possuem mais de 90 mil habitantes, sendo que as disposições finais dos resíduos sólidos chegam a 1.100 toneladas ao mês. O trabalho será o de reduzir os resíduos e encaminhá-los para coleta seletiva.

Segundo Web-Resol (2000b) os Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos deverão contemplar no mínimo: a origem, a caracterização e a quantidade de resíduos gerados; os procedimentos a serem adotados na segregação, coleta classificação, acondicionamento, armazenamento, transporte, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final, conforme a classificação dos resíduos, indicando-se os locais e condições onde essas atividades serão implementadas. Ainda deverão estar indicadas: as ações preventivas e corretivas pelo manuseio incorreto ou acidentes; responsável técnico pela elaboração e execução do plano; projeto básico acompanhado de planilha orçamentária; áreas adequadas para o tratamento e a disposição final de resíduos sólidos.

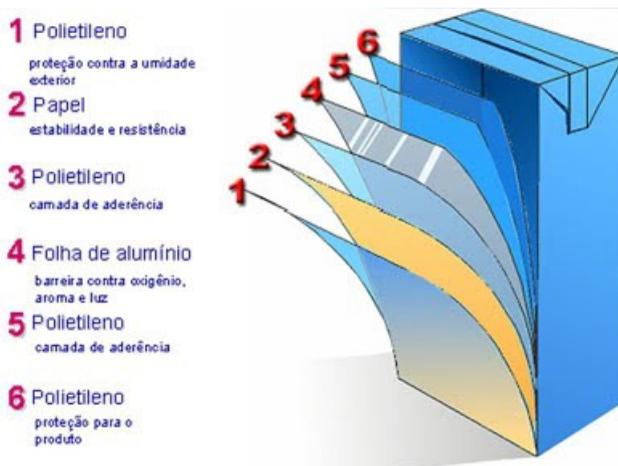
Os resíduos que até algum tempo eram considerados sem valor ou nocivos, hoje, além de um problema social do descarte inadequado, passam a ter seu potencial valorizado o que impulsiona a sociedade na direção do reaproveitamento quer no reuso ou reciclagem em cada vez mais quantidade e, de consumo cada vez em menor quantidade.

### **3.2.2 Embalagens cartonadas**

As embalagens cartonadas são compostas de 3 materiais diferentes em 6 camadas compactadas (Figura 9). A tecnologia dessa embalagem permite que o mantimento não oxide e nem receba luz externa.

A embalagem cartonada longa vida foi lançada no Brasil em 1957 pela Tetra Pak, quando se instalou comercialmente, com a função de envasar alimentos líquidos (leites e sucos), semilíquidos (molhos de tomate) e viscosos (maionese), embora seu primeiro produto tenha sido inventado pelo Dr. Ruben Rausing, que idealizou a embalagem em formato de tetraedro (quatro faces, triangular, com base horizontal). Seu material é um laminado que consiste em papel (75%), polietileno (20%) e alumínio (5%), sendo que cada um dos componentes possui uma função. O papel dá suporte mecânico à embalagem e recebe a impressão; o polietileno protege a embalagem da umidade e impede o contato do alumínio com os alimentos, além de servir como elemento de adesão para todos os materiais componentes da embalagem; e o alumínio cria uma barreira contra a luz, o oxigênio além de microorganismos e bactérias (Cempre, 1997b).

Figura 9 - Embalagem cartonada e suas diferentes camadas.



Fonte: [http://www.tetrapak.com.br/tetravc/images/ciclo\\_emb\\_imgmat.jpg](http://www.tetrapak.com.br/tetravc/images/ciclo_emb_imgmat.jpg) visitada em 12/12/2012.

Esse tipo de embalagem tem a capacidade de preservar os alimentos durante meses, sem a necessidade de refrigeração e conservantes.

Porém, pelas camadas estarem tão compactadas, a separação dos diferentes materiais para reciclagem sempre foi um desafio. Esta

embalagem representa um resíduo de complexa composição (seis camadas alternadas de papel, alumínio e plástico).

A embalagem tipo longa vida, no entanto, seria criada apenas em 1961. Foi neste ano que Dr. Ruben Rausing uniu os conceitos de ultrapasteurização e embalagem asséptica, criando a embalagem que protegeria o leite, sem necessidade de conservantes e refrigeração. Tetra Pak, foi fundada no conceito de que uma embalagem deveria guardar mais do que o seu custo

Segundo Fernando Luiz Neves, coordenador de uma pesquisa no Brasil para embalagens Tetra Pak, é possível reciclar todos os componentes da embalagem:

“A reciclagem das embalagens é feita primeiramente em fábricas de papel que utilizam as fibras para fabricação dos diversos tipos de papel” (Figura 10).

Figura 10 - Fases inicial e final do processamento em fábricas de papel utilizando o equipamento “hidrapulper”.



Fonte: <http://www.tetrapak.com.br> visitada em 12/12/2012

“A reciclagem do polietileno e do alumínio, gerados na fábrica de papel, pode ser feita de três maneiras diferentes: a recuperação de energia do alumínio e polietileno através da incineração em caldeiras de biomassa, possibilitando economia de óleo combustível, a recuperação do alumínio em fornos de pirólise ou ainda a fabricação de peças por processos de extrusão ou termo-injeção”. (Figura 11).

Figura 11 - Produtos produzidos a partir da reciclagem de embalagens cartonadas



Fonte: <http://reciclaongavida.wordpress.com/projeto/vassouras2/> visitada em 12/12/2012

### 3.2.3 Embalagens de politereftalato de etileno (PET)

Politereftalato de etileno, ou PET, é um polímero termoplástico, desenvolvido por dois químicos britânicos Whinfield e Dickson em 1941, formado pela reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol, originando um polímero, termoplástico. Utiliza-se principalmente na forma de fibras para tecelagem e de embalagens para bebidas.

Possui propriedades termoplásticas, isto é, pode ser reprocessado diversas vezes pelo mesmo ou por outro processo de transformação. Quando aquecidos a temperaturas adequadas, esses plásticos amolecem, fundem e podem ser novamente moldados.

As garrafas produzidas com este polímero só começaram a ser fabricadas no ano de 1970, após cuidadosa revisão dos aspectos de segurança e meio ambiente. (Figura 12).

Figura 12 - Embalagens produzidas com PET



Fonte: <http://www.embalaweb.com.br/noticias>

No começo do ano de 1980, os Estados Unidos e o Canadá iniciaram a coleta dessas garrafas, reciclando-as inicialmente para fazer enchimento de almofadas. Com a melhoria da qualidade do PET reciclado, surgiram aplicações importantes, como tecidos, lâminas e garrafas para produtos não alimentícios.

Mais tarde na década de 1990, o governo americano autorizou o uso desse material reciclado em embalagens de alimentos.

Como referência de consumo: de todo refrigerante produzido no país, 68% é embalado em garrafas PET, sendo que 1 kg de PET equivale: 16 garrafas de 2,5 litros ou 20 garrafas de 2,0 litros ou 24 garrafas de 1,5 litros ou 26 garrafas de 1,0 litro ou 36 garrafas de 600 ml ([www.websucata.com.br/plastico/artigos/reciclagem-de-garrafas-pet-153.html](http://www.websucata.com.br/plastico/artigos/reciclagem-de-garrafas-pet-153.html) acessado em 20/12/2012).

Em 2011, o Brasil deu a destinação correta a 294 mil toneladas de embalagens de PET pós-consumo, o que representa 57,1% das embalagens descartadas pelo consumidor. Os números são do 8º Censo da Reciclagem do PET no Brasil e foram divulgados pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET) no dia 11 de junho (Portal embalaweb, acessado em 18-12-2012).

### 3.2.4 Latas de alumínio

As latas de alumínio para bebidas (Figura 13) começaram a ser fabricadas no país em 1989 e substituiriam as embalagens de cerveja, refrigerantes, sucos, entre outras, que eram feitas de vidro, material plástico ou latas de folha de flandres.

Figura 13 - Embalagens de alumínio para bebidas



Fonte: ABAL – Associação Brasileira de Alumínio.

De acordo com a Associação Brasileira de Fabricantes de Latas de Alta Reciclabilidade (Abralatas), 95% das bebidas vendidas em latas no país, atualmente, utilizam embalagem de alumínio.

Como vantagens do uso dessas embalagens para bebidas, pode-se citar: pesam muito menos que as similares de aço, permitem refrigeração mais rápida, ocupam menos espaço nas geladeiras e são mais práticas para armazenamento, uma vez que o fundo de uma se encaixa na tampa da outra. Outro ponto importante é que não podem ser violadas sem deixar marcas, algo possível de ocorrer com outras embalagens de bebidas, como as garrafas de vidro.

Para atender à enorme demanda, as empresas do setor de alumínio fornecem o metal preparado para a indústria de embalagens, principalmente na forma de laminados.

Uma lata de alumínio pesa aproximadamente 14,5 gramas. 67 latinhas de alumínio correspondem a 1 kg. Cada 1.000 kg de alumínio reciclado significam 5 mil kg de minério bruto (bauxita) poupados. O Brasil possui uma das três maiores reservas de bauxita do mundo. Para reciclar o alumínio são gastos apenas 5% da energia utilizada na extração. Todo o processo de reciclagem do alumínio no Brasil envolve mais de 2 mil empresas. Atualmente, no Brasil, são consumidas 51 latas de alumínio por habitante por ano, enquanto nos Estados Unidos esse número chega a 375 latas por habitante.

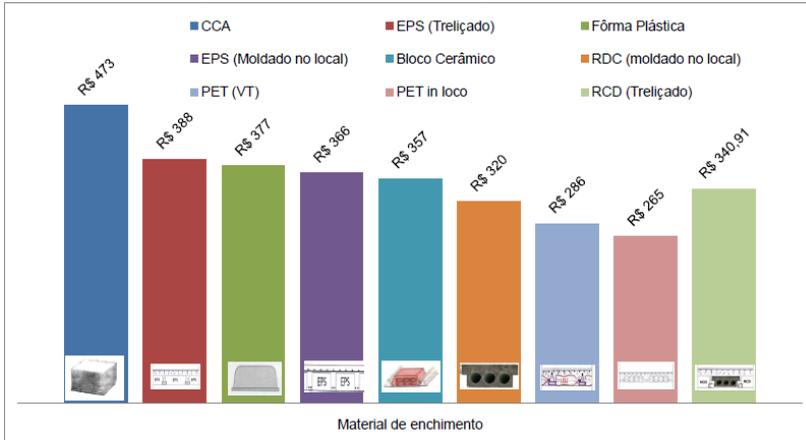
### 3.3 LAJES PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO PRODUZIDAS COM MATERIAIS RECICLADOS

Os recursos naturais são finitos e seu consumo é crescente. Assim, torna-se cada vez mais importante sua utilização de forma racional e a sua reutilização, quando oportuno. Neste contexto, a indústria da construção tem uma necessidade constante pelo desenvolvimento de sistemas construtivos mais eficientes, com utilização racional dos materiais, mais econômicos e sustentáveis. Conhecida como a maior indústria, tem forte impacto no crescimento econômico e no desenvolvimento de uma sociedade e, devido ao seu elevado consumo de matérias primas, consumo de energia e geração de resíduos, deve manter preocupação constante na tentativa de reduzir seus impactos ambientais. Para isso existem duas vias principais: i) a redução do consumo de materiais ou uso de materiais e sistemas construtivos mais eficientes; ii) através da reciclagem de materiais.

A indústria da construção apresenta-se como uma das melhores alternativas para o consumo de materiais recicláveis, pois a atividade de construção é realizada em qualquer região, o que já reduz custos, como o de transporte. Além disso, os materiais necessários para produção da grande maioria dos componentes de uma edificação não necessitam grande sofisticação técnica. No entanto, de maneira geral, as pesquisas de reciclagem de resíduos se limitam a aspectos do desenvolvimento técnico do material e, atualmente, com maior frequência, à análise dos impactos ambientais do processo. Entretanto, a ênfase em viabilidade do mercado é um compromisso com a eficácia da pesquisa, pois os benefícios sociais de um processo de pesquisa somente vão se realizar na sua totalidade se o novo produto gerar empregos, reduzir o volume de aterros, consumir resíduos, e não recursos naturais, e evitar a contaminação do ambiente ou o comprometimento com a saúde da população (Angulo, et al. 2010).

Atualmente, as lajes nervuradas de concreto são frequentemente produzidas utilizando como material de enchimento as tabelas cerâmicas. Existem algumas alternativas convencionais às tabelas cerâmicas, como blocos de poliestireno expandido, fôrmas plásticas, etc, porém com custos superiores aos elementos mais utilizados, conforme pode ser observado na Figura 14 (SILVA e SILVA, 2010). Inúmeras pesquisas estão sendo realizadas com objetivo de aumentar a eficiência de lajes através da utilização de concretos ou compósitos mais leves (Keller et al., 2007; Schaumann et al. 2008). Para isso são frequentemente utilizados agregados leves, tais como: resíduos industriais leves (Rebeizet al., 1993), materiais poliméricos de maneira geral (Ogi et al. 2005; Kitsutaka e Uchida, 2012), borrachas recicladas a partir de pneus, principalmente pela sua disponibilidade (Sukontasukkul, 2009; Milaneze Bührs, 2009; Pelisser et al. 2011), e argila expandida.

Figura 14 - Custo por metro quadrado de lajes nervuradas



Fonte: (SILVA e SILVA, 2010).

Contudo, existem, em nível nacional, raras pesquisas sobre a reciclagem de PET - como material de enchimento - para fabricação de lajes de concreto nervuradas e pré-fabricadas. Porém, estudos científicos utilizando as garrafas de PET (ou outro tipo de embalagem) como material de enchimento no lugar das tabelas cerâmicas, com função de fundo de fôrma, são praticamente inexistentes.

Considerando o exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência de lajes pré-fabricadas, que tiveram seus elementos cerâmicos substituídos por embalagens descartáveis. Como o raio de alcance de um resíduo beneficiado é fundamental na análise de sua reutilização, foram inicialmente avaliados os materiais disponíveis em maior volume numa central de reciclagem, utilizando-se, como referência, a do município de Criciúma/Santa Catarina, com aproximadamente 200 mil habitantes. Assim, foram definidas as embalagens de PET, embalagens cartonadas (tipo tetra pak) e latas de alumínio como materiais de substituição e análise.

Dessa forma foi avaliado nesta pesquisa o comportamento mecânico, a densidade e a viabilidade econômica de lajes pré-fabricadas de concreto, em escala real, utilizando esses materiais alternativos.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

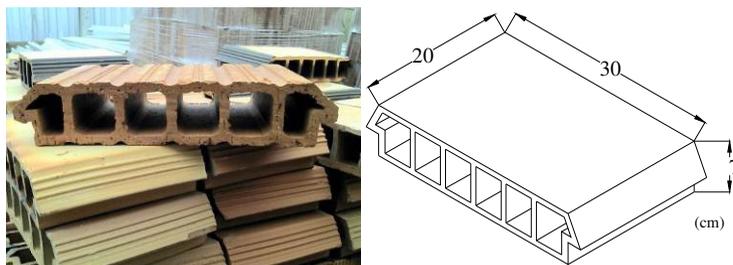
No planejamento experimental foi definida a moldagem de 12 protótipos. São todas lajes pré-fabricadas unidirecionais em escala real, utilizando 4 elementos de enchimento distintos: blocos cerâmicos vazados (lajotas ou telas cerâmicas), embalagens cartonadas, latas de alumínio e garrafas de PET. Todas as embalagens utilizadas têm origem na coleta seletiva de resíduos sólidos. Para cada tipo de elemento de enchimento fabricaram-se 3 protótipos com 3 m de comprimento total, compostas, além do material de enchimento, por 4 vigotas pré-moldadas de concreto armado, capa de compressão de 4cm de concreto usinado C25 e aço CA-60 diâmetro 5,0mm, para a armadura de distribuição da capa. Nos itens seguintes são apresentados os materiais empregados, o procedimento de fabricação das lajes e métodos de ensaio.

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Telas cerâmicas

As telas cerâmicas empregadas se enquadram nas dimensões preconizadas pela NBR 14860-1/2002, conforme Figura 15.

Figura 15 - Geometria da tela cerâmica utilizada.



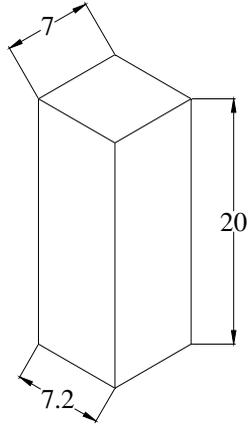
Fonte: Dados do pesquisador.

#### 4.1.2 Embalagens cartonadas

As embalagens cartonadas adotadas foram aquelas utilizadas para acondicionar alimentos líquidos como leite e sucos. Sua aplicação foi direta, sem qualquer manufatura ou preparo, tomando-se o cuidado apenas de manter a tampa da embalagem fechada. O formato utilizado

foi o prismático com base de 7,0 cm x 7,2 cm e altura de 20 cm, como ilustra a Figura 16.

Figura 16 - Geometria da embalagem cartonada.

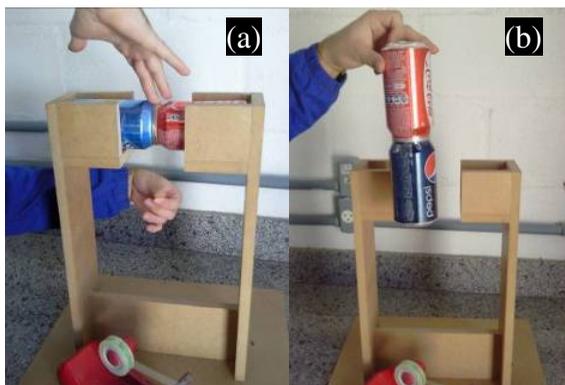


Fonte: Dados do pesquisador.

#### 4.1.3 Latas de alumínio

As latas de alumínio (0,35 litros) foram unidas aos pares, por meio de fita adesiva. Montou-se um artefato de madeira para facilitar e aumentar a produtividade para união das latas. As dimensões dos conjuntos, formados por duas latas, ficaram com 24 cm de comprimento e 6,6 cm de diâmetro. A Figura 17 mostra a manufatura das latas e a peça pronta para aplicação.

Figura 17 - (a) e (b) - Sequência de montagem das latas de alumínio para aplicação como elementos de enchimento nos protótipos de lajes.



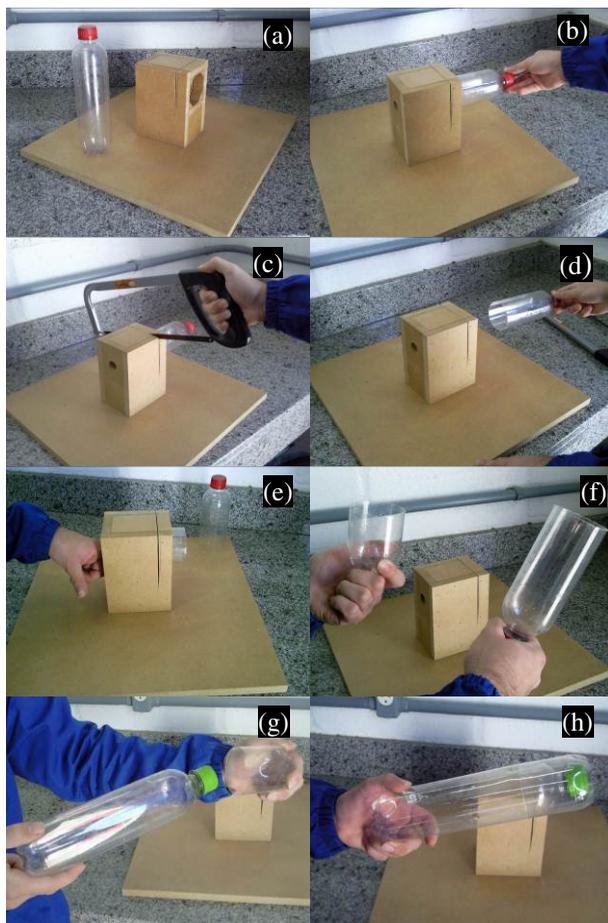
Fonte: Dados do pesquisador.

#### 4.1.4 Garrafas de PET

A embalagem selecionada para utilização na pesquisa foi a de volume 0,60 litros, usada para comercialização de refrigerante de grande aceitação na região.

Para a utilização das garrafas de PET, também foi criado um artefato de madeira para facilitar a manufatura do conjunto de um par de garrafas. Nesse caso, utilizou-se uma garrafa inteira com tampa, acoplada com a parte inferior cortada de outra, formando assim um tubo. As dimensões dos conjuntos ficaram com 25 cm de comprimento e 6,0 cm de diâmetro. A Figura 18 mostra a manufatura e o resultado final dos tubos de garrafas de PET.

Figura 18 - (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) e (h) - Sequência de montagem das garrafas de PET para aplicação como elementos de enchimento nos protótipos de lajes.

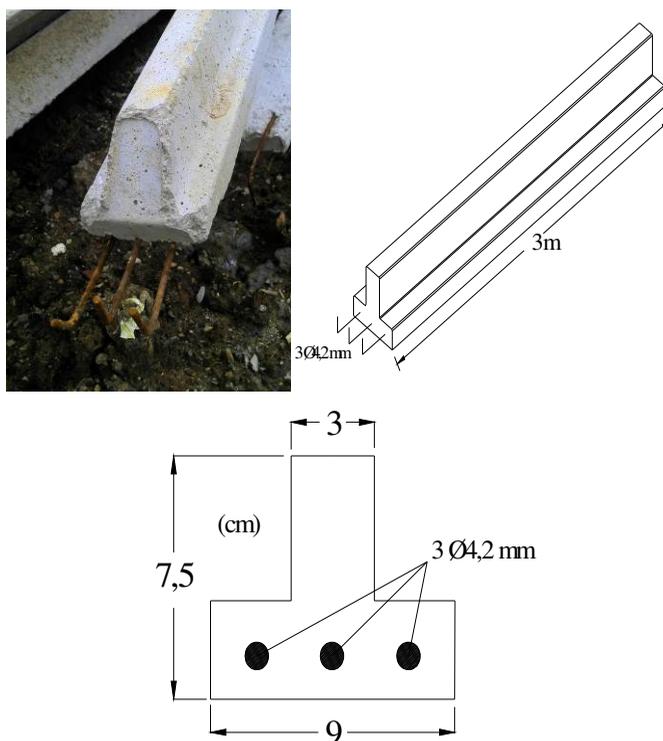


Fonte: Dados do pesquisador.

### 4.1.5 Vigotas pré-moldadas

As vigotas pré-moldadas de concreto armado utilizadas em todas as amostras são do mesmo fornecedor. Em todos os tipos de laje foram utilizadas 4 vigotas com 3 m de comprimento, dimensão adotada por ser a mais representativa nas obras que utilizam esse sistema estrutural. O concreto das vigotas foi especificado pelo fabricante como classe C25 (Resistência característica à compressão aos 28 dias de 25 MPa) e a armadura de flexão composta por 3 barras na face inferior, de aço CA-60 com diâmetro nominal de 4,2 mm. A Figura 19 apresenta a geometria das vigotas utilizadas.

Figura 19 - Vigota pré-moldada de concreto armado



Fonte: Dados do pesquisador.

#### 4.1.6 Concreto fresco

O concreto utilizado na capa de compressão foi usinado de classe C20. Durante a concretagem foram moldados corpos-de-prova cilíndricos com 10x20 cm (diâmetro x altura - conforme NBR 5738/03) para avaliar a resistência à compressão (NBR 5739) e o módulo de elasticidade (NBR 8522). Na Tabela 2 estão apresentados os resultados médios e a evolução da resistência com a idade. Os resultados apresentados são a média de 3 amostras. Os ensaios de caracterização mecânica foram realizados simultaneamente aos ensaios de flexão em 4 pontos realizados nos protótipos de lajes. Esses procedimentos ocorreram aos 180 dias de idade, tendo em vista a demora na importação de equipamentos necessários aos testes de laboratório.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do concreto utilizado na capa de compressão.

Idade de Ruptura (dias)	Resistência à compressão axial (MPa)	Módulo de elasticidade à compressão (GPa)
07	14,8±0,38	28,4±1,32
14	15,5±0,44	29,5±0,31
21	18,1±0,40	30,3±1,63
28	20,1±1,35	31,5±0,78
180	31,4±1,06	37,9±1,35

Fonte: Dados do pesquisador

#### 4.1.7 Armadura de distribuição

Segundo a NBR 14859-1/2002, na capa de compressão é recomendado a disposição de armadura de distribuição para o controle da fissuração e para a distribuição das tensões provenientes de ações concentradas. Deste modo em todas as lajes foram utilizadas, na capa de compressão, uma malha de aço CA-60 com diâmetro de 5,0 mm, espaçada a cada 20 cm.

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Fabricação dos protótipos

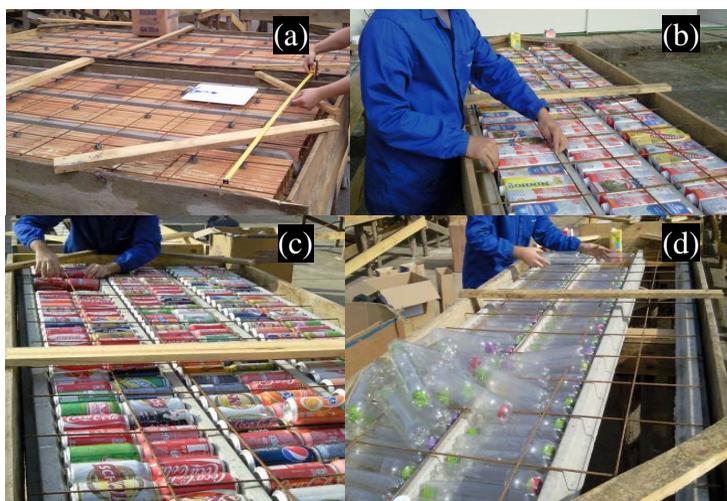
Após a coleta e armazenamento dos materiais de enchimento alternativos (Figura 20), a manufatura dos protótipos das lajes iniciou-se com a colocação das vigotas pré-fabricadas apoiadas sobre plataformas de madeira e na sequência, os elementos de enchimento e a malha de aço. A Figura 21 mostra a sequência das montagens dos protótipos.

Figura 20 - Armazenamento dos 3 tipos de embalagens empregadas.



Fonte: Dados do pesquisador

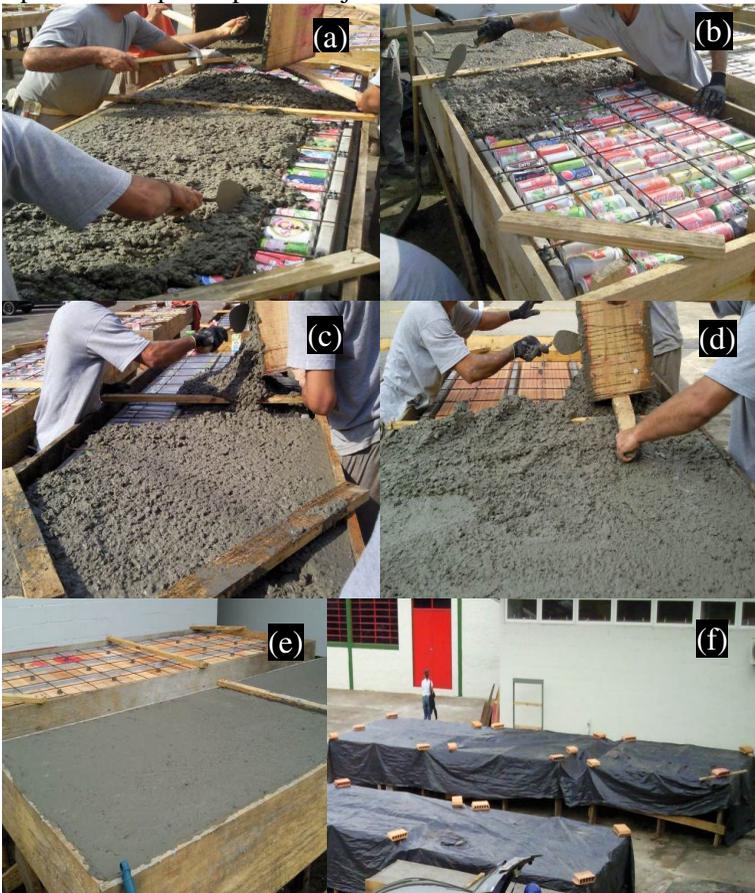
Figura 21 - Montagem dos protótipos: tavela cerâmica (a), embalagens cartonadas (b), latas de alumínio (c), embalagens de PET (d).



Fonte: Dados do pesquisador

Definida a espessura da capa de compressão em 4,0 cm (NBR 14859 Parte 1) procedeu-se à concretagem simultânea dos protótipos com posterior acabamento da superfície e cura por umedecimento durante um período de 7 dias. A Figura 22 mostra a sequência de concretagem e procedimento de cura. Após o período de 28 dias os protótipos foram desmoldados e armazenados próximos ao laboratório, até a idade dos ensaios de flexão em 4 pontos, realizado aos 180 dias, uma vez que a totalidade dos equipamentos que compunham o aparato para o ensaio só foram disponibilizados neste período.

Figura 22 - (a), (b), (c), (d), (e) e (f) Concretagem e cura da capa de compressão dos protótipos das lajes utilizando concreto usinado.



Fonte: Dados do pesquisador

A Figura 23 mostra uma vista inferior dos protótipos das lajes após a concretagem. Todos os protótipos possuem 3,0 metros de comprimento total, quatro vigotas, sendo que, sua largura foi imposta pela dimensão longitudinal do material de enchimento, que foi posicionado transversalmente às vigotas.

Figura 23 - Vista inferior dos protótipos finalizados: tavela cerâmica (a), embalagem cartonada (b), lata (c) e garrafas de PET (d).



Fonte: Dados do pesquisador

#### 4.2.2 Determinação da Densidade

Após a concretagem os protótipos foram identificados em função do tipo de elemento de enchimento. As lajes que utilizaram tavela cerâmica foram identificadas por LJTV; embalagem cartonada por LJCX, lata de alumínio por LJLT e garrafas por LJPET. Determinou-se para cada amostra, suas dimensões e o peso total. Para isso foi utilizada uma empilhadeira à combustão (Figura 24 A) e uma balança com capacidade máxima de 2.000 kg (Figura 24 B).

Figura 24 - (a) Empilhadeira utilizada para posicionar os protótipos sobre a balança e (b) pesagem dos protótipos de lajes.



Fonte: Dados do pesquisador.

#### 4.2.3 Ensaio de flexão em 4 pontos

Todas as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à flexão em 4 pontos, aos 180 dias de idade, para avaliação do desempenho estrutural. Foi utilizada a norma europeia BS EN 15037-1/08, pois a normalização brasileira não preconiza este ensaio. Esta norma estipula que: a velocidade de aplicação do carregamento deve ser menor que 0,1 kN/s; os pontos de aplicação de carga devem ser nos terços médios do vão; deve-se realizar o carregamento até flecha limite de  $L/500$  e logo após o descarregamento com registro da flecha residual e por fim o carregamento até a ruptura. Entretanto a norma brasileira NBR 6118:2007 preconiza que a flecha limite para carga total de lajes pré-fabricadas, deve ser considerada igual a  $L/250$ . Em função dessa prescrição normativa brasileira, acrescentou-se mais um patamar de carga e descarregamento na realização do ensaio, ou seja, em  $L/250$ , executou-se mais um procedimento de carga e descarga com registro da flecha residual. Para o ensaio de flexão posicionaram-se as lajes sob um pórtico de reação e aplicou-se a carga a partir de um cilindro hidráulico de controle elétrico com capacidade de 500 kN. Aplicou-se a carga transversalmente nos terços médios do protótipo por meio de uma viga de distribuição metálica com perfil I sobre 2 roletes (Figura 25). Os valores de carga são registrados por meio de uma célula de carga posicionada entre o cilindro hidráulico e a viga de distribuição.

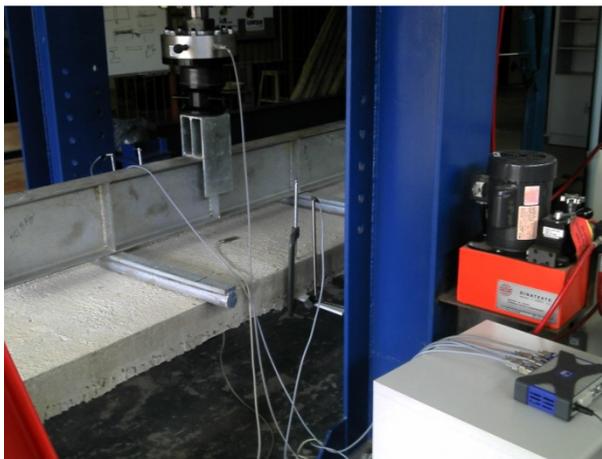
Avaliou-se em cada laje, os deslocamentos verticais no meio do vão com a utilização de dois transdutores indutivos de deslocamentos (LVDT - *Linear Variable Differential Transformer*) posicionados em lados opostos do vão central, com capacidade de leitura de 100 mm.

Também foram utilizados *straingages* (comprimento de 50 mm) posicionados no centro do vão para medir as deformações específicas do concreto na borda superior (capa de compressão) e da borda inferior (vigota), conforme indicado na Figura 25. Foi utilizado o sistema de aquisição de dados *QuantumX* (marca *HBM*) com interface com o software *CatmanEasy*. A Figura 26 mostra o esquema montado para o ensaio de flexão em 4 pontos.

O procedimento do ensaio de flexão adotou a seguinte sequência: 1º) posicionou-se a laje sobre dois apoios de 20cm de largura cada; 2º) inicialmente foram realizados dois ciclos de pré-carga visando à acomodação do protótipo, carregando até 5% de sua carga de ruptura, carga essa, estabelecida no ensaio da laje teste, e descarregando em seguida; 3º) após a acomodação do protótipo, iniciou-se o carregamento até a flecha de  $L/500$  (conforme BS EN 15037) e logo em seguida foi descarregado; 4º) o segundo carregamento foi realizado até a flecha de  $L/250$  (conforme NBR 6118) e descarregando-o novamente; 5º) ao final os protótipos foram carregados até o instante em que, embora houvesse tentativa de aplicação de carregamento, eles só apresentavam aumento de deformação.

No decorrer dos ensaios de flexão, registrou-se o surgimento e desenvolvimento das fissuras que ocorreram nas faces inferior e lateral na região central dos protótipos.

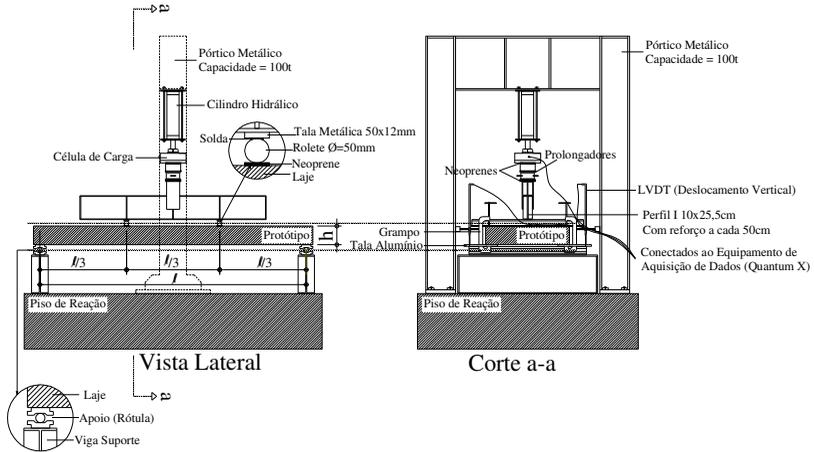
Figura 25 - Posicionamento dos sensores na laje de ensaio.



Fonte: Dados do pesquisador.

Figura 26 - Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos realizado nos protótipos de lajes, mostrando a vista lateral e um corte esquemático.

### Esquema Geral de Ensaio



Fonte: Dados do pesquisador.

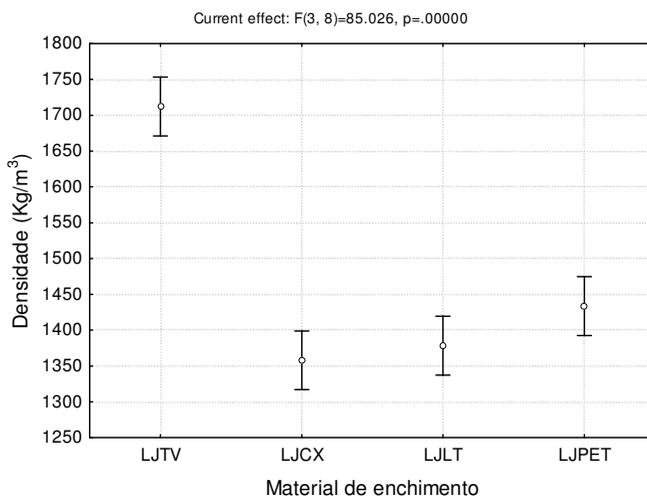
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente são apresentados os resultados da densidade dos protótipos. Na sequência são apresentados os resultados de resistência à flexão e a avaliação econômica.

### 5.1 DENSIDADE

A Figura 27 e a Tabela 3 mostram os resultados obtidos da caracterização dos protótipos, quanto às suas dimensões e densidade. Os protótipos fabricados com embalagens cartonadas, latas de alumínio e garrafas de PET apresentaram uma diminuição significativa na densidade, em comparação, aos fabricados com tabelas cerâmicas: cerca de 20,7%, 19,5% e 16,3% mais leves, respectivamente. Apesar do considerável decréscimo na densidade, todos os protótipos com material alternativo apresentaram espessuras médias superiores às aquelas apresentadas pelos protótipos com tabelas e distâncias menores entre as vigotas, o que implica na redução da largura total da laje quando comparada com a que utiliza tabela.

Figura 27 - Densidade dos protótipos de lajes.



Fonte: Dados do pesquisador.

Tabela 3 - Resultados da caracterização dos protótipos de lajes.

Protótipo Laje	Comprimento L (cm)	Largura b (cm)	Espessura h (cm)	Peso total (kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )
LJTV1	299,83	126,97	12,03	768,5	1678,04
LJTV2	300,50	126,50	11,52	756,5	1727,51
LJTV3	299,93	126,17	11,93	781,5	1731,06
LJCX1	298,80	85,83	14,37	502,5	1363,51
LJCX2	300,10	85,77	14,18	501,5	1374,02
LJCX3	300,00	86,00	14,33	494,0	1336,17
LJLT1	299,83	96,50	13,80	559,0	1400,01
LJLT2	299,83	96,50	13,43	536,0	1379,39
LJLT3	300,00	96,70	13,32	524,0	1356,06
LJPET1	300,77	95,97	13,55	562,0	1436,97
LJPET2	301,30	96,40	13,68	587,0	1477,47
LJPET3	299,10	95,84	12,60	501,0	1387,08

Fonte: Dados do pesquisador

## 5.2 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO.

Através da resistência à flexão pode-se analisar o comportamento estrutural das lajes. Na tabela 4 podem ser observados os resultados dos deslocamentos em diferentes ciclos de carregamento (L/500 e L/250) - junto com a carga de ruptura. Foi observado que a carga de ruptura foi superior para as lajes que utilizaram embalagens recicladas leves no lugar de componentes cerâmicos, como pode-se verificar nas Fig. 28 e 29. Na Figura 28 é apresentado o resultado de uma laje (escolhida entre 3 amostras) que melhor representa o comportamento médio de cada tipologia (com resultado próximo da média, conforme pode ser observado na Tabela 4), mostrando o acréscimo de carga em razão do deslocamento vertical no vão central, obtido pela média de 2 LVDTs, posicionados em lados opostos. Podem ser observados também os valores obtidos nos dois ciclos de carga e descarga em L/500 e L/250. Os resultados da carga de ruptura são

próximos aos obtidos em ensaios de flexão, para diferentes tipos de lajes (Benayouneet al., 2008; Mohammed, 2010; Centonze, Leone e Aiello, 2012), indicando uma satisfatória resistência dos protótipos de lajes com materiais de enchimento reciclados.

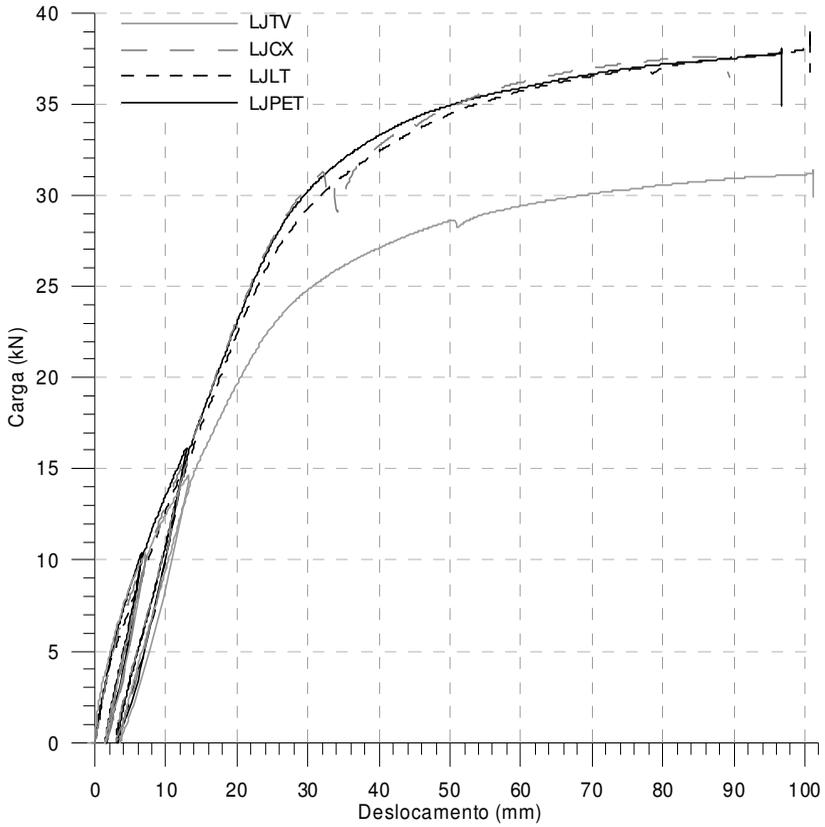
Através da análise estatística (ANOVA – com teste de Duncan - adotando um limite de confiabilidade de 95%) observou-se um comportamento equivalente entre os diferentes materiais de enchimentos (Tabela 5) e diferente para laje de referência (Tabela 6 e figura 28), que utilizou lajotas cerâmicas. Na Figura 28, observa-se que o valor do deslocamento máximo ultrapassou a capacidade nominal máxima de leitura do LVDT, o que demonstra uma capacidade adicional de leitura do equipamento na ordem de 2mm.

Tabela 4 - Resumo dos resultados dos deslocamentos em função do carregamento e as cargas de ruptura.

Laje	L/500 (6mm)		L/250 (12mm)		Carga ruptura (kN)
	Carga (kN)	Desloc. residual (mm)	Carga (kN)	Desloc. residual (mm)	
LJTV1	9,3	1,29	13,3	3,69	31,5
LJTV2	8,8	1,39	12,6	3,52	31,2
LJTV3	9,6	1,44	14,0	3,49	31,4
Média	9,2±0,4	1,37±0,08	13,3±0,7	3,57±0,11	31,4±0,1
LJCX1	9,6	1,68	13,7	-	36,7
LJCX2	8,0	2,28	13,9	3,79	38,2
LJCX3	9,2	1,59	15,1	2,80	37,6
Média	8,9±0,8	1,85±0,38	14,2±0,7	3,30±0,70	37,5±0,8
LJLT1	8,6	1,52	14,7	2,94	38,8
LJLT2	7,7	2,17	13,2	3,78	37,1
LJLT3	8,5	1,60	13,8	2,81	35,0
Média	8,3±0,5	1,76±0,35	13,9±0,8	3,18±0,53	37,0±1,9
LJPET1	8,0	1,72	12,2	3,95	36,7
LJPET2	9,8	1,43	14,2	3,09	38,0
LJPET3	6,8	2,00	11,7	3,31	32,7
Média	8,2±1,5	1,72±0,29	12,7±1,3	3,45±0,45	35,8±2,7

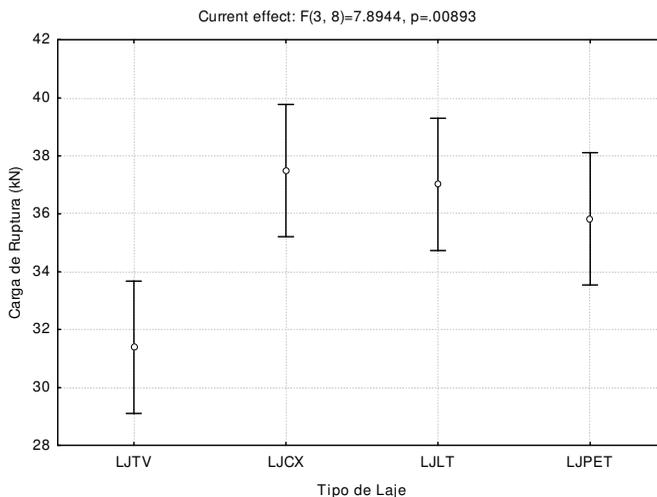
Fonte: Dados do pesquisador.

Figura 28 – Média dos deslocamentos dos protótipos das lajes.



Fonte: Dados do pesquisador.

Figura 29 - Carga de ruptura média para cada tipo de protótipo de laje.



Fonte: Dados do pesquisador.

Tabela 5 - Análise estatística ANOVA considerando o tipo de laje.

Variável	Soma dos quadrados (Q)	Graus de liberdade (G L)	Média dos quadrados (MQ)	Parâmetro Fisher-F	Significância dos resultados-p
Laje	69,67	3	23,22	7,894	0,008933
Erro	23,53	8	2,94	-	-

Fonte: Dados do pesquisador.

Tabela 6 - Teste de Duncan considerando o tipo de laje.

Laje	LJTV	LJCX	LJLT	LJPET
LJTV	-	0,003534	0,004861	0,013448
LJCX	0,003534	-	0,744665	0,287204
LJLT	0,004861	0,744665	-	0,419587
LJPET	0,013448	0,287204	0,419587	-

Fonte: Dados do pesquisador.

Considerando que os elementos resistentes das lajes são as vigotas, foi determinado o momento resistente de cada uma delas a partir da carga de ruptura. Levou-se em consideração a espessura, peso próprio e principalmente o espaçamento entre eixos das vigotas. O desenho esquemático do posicionamento das vigotas e da distribuição de carregamento utilizado para a determinação do momento fletor resistente pode ser observado na Figura 30. Nesse esquema de distribuição de carregamento a carga concentrada sobre o perfil I foi dividida igualmente para os roletes como carga concentrada. Esse valor foi multiplicado pela largura da laje, obtendo-se uma carga linear no eixo longitudinal dos roletes. Para obtenção da carga concentrada nas vigotas internas da laje, multiplicou-se esta carga linear pela distância compreendida entre os centros dos elementos de enchimento, que corresponde à área de influência da carga sobre a vigota. A variação das distâncias entre as vigotas dos diferentes protótipos conduziram a um resultado equivalente para o momento fletor. Na Tabela 7 podem ser observadas as dimensões dos protótipos, as distâncias entre vigotas e o momento fletor resistente. Através da análise estatística (ANOVA – teste de Duncan) concluiu-se que não houve diferença significativa quanto à capacidade portante dos diferentes protótipos, o que significa dizer que todos são equivalentes e tecnicamente viáveis do ponto de vista estrutural.

Para estabelecer o valor do máximo momento fletor para cada vigota, foi utilizada a equação básica da resistência dos materiais, ou seja:

$$M_{\text{máx.}} = [(q'l^2/8) + (P' \cdot (l/3))] \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

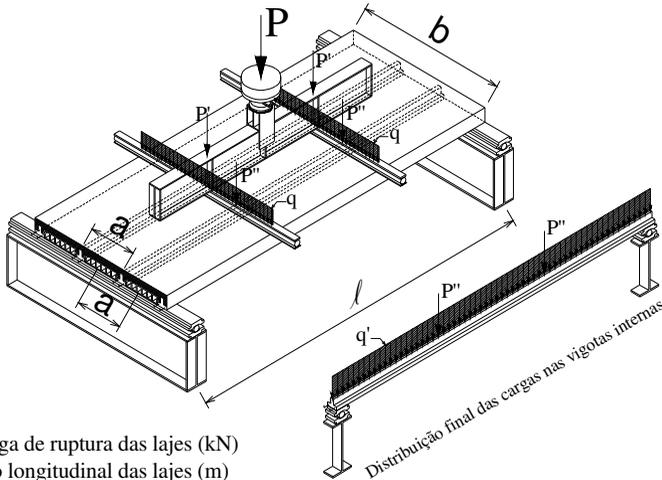
- $M_{\text{máx}}$  = momento fletor máximo
- $q'$  = carga distribuída no eixo longitudinal da vigota
- $P'$  = cargas concentradas aplicadas na vigota
- $l$  = vão teórico da vigota

Tabela 7 - Resultados do ensaio de flexão nas vigotas internas.

Amostra	Q (kN/m <sup>2</sup> )	P (kN)	l (m)	b (m)	a (m)	P' (kN)	q (kN/m)	P'' (kN)	q' (kN/m)	Mk (kN.m)
TV1	2,02	31,30	3,00	1,27	0,38	15,65	12,33	2,36	12,33	5,59
TV2	1,99	31,20	3,01	1,27	0,38	15,60	12,33	2,36	12,33	5,59
TV3	2,06	31,40	3,00	1,26	0,38	15,70	12,44	2,38	12,44	5,66
									<b>Média</b>	<b>5,61</b>
PET1	1,99	36,70	3,01	0,96	0,29	18,35	19,12	2,75	19,12	6,14
PET2	1,95	38,00	3,01	0,96	0,29	19,00	19,71	2,83	19,71	6,29
PET3	1,95	32,70	2,99	0,96	0,29	16,35	17,05	2,45	17,05	5,53
									<b>Média</b>	<b>5,99</b>
CX1	1,96	36,70	2,99	0,86	0,25	18,35	21,38	2,67	21,38	5,9
CX2	1,95	38,20	3,00	0,86	0,25	19,10	22,27	2,78	22,27	6,12
CX3	1,92	37,60	3,00	0,86	0,25	18,80	21,86	2,73	21,86	6
									<b>Média</b>	<b>6,01</b>
LT1	1,96	38,80	3,00	0,97	0,29	19,40	20,1	2,89	20,1	6,41
LT2	1,95	37,10	3,00	0,97	0,29	18,55	19,22	2,76	19,22	6,16
LT3	1,92	35,00	3,00	0,97	0,29	17,50	18,1	2,6	18,1	5,82
									<b>Média</b>	<b>6,13</b>

Fonte: Dados do pesquisador.

Figura 30 - Esquema de distribuição de carregamento.



$P$  = Carga de ruptura das lajes (kN)

$l$  = Vão longitudinal das lajes (m)

$b$  = Largura das lajes (m)

$a$  = Distância entre eixos das vigotas e do material de enchimento (m)

$P'$  =  $P/2$  - carga aplicada no centro do rolete (kN)

$q$  =  $P'/b$  - carga distribuída sobre o rolete na largura  $b$  (kN/m)

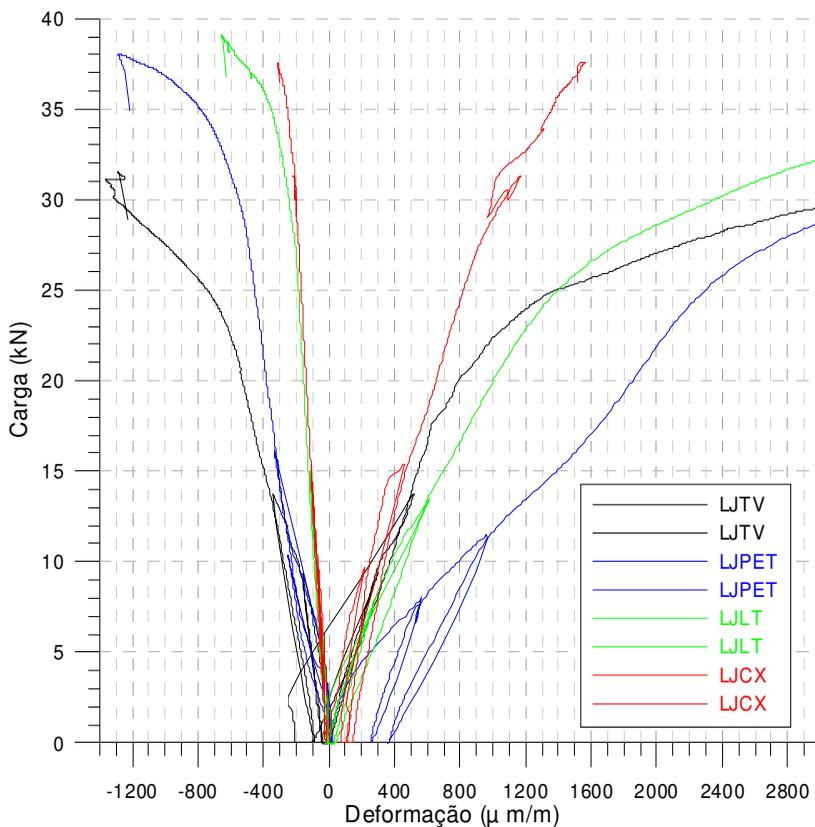
$P''$  =  $q' \cdot a$  - cargas concentradas nas vigotas (kN)

$q'$  = Peso próprio da laje na faixa "a".

Fonte: Dados do pesquisador.

Na figura 31 estão apresentadas as deformações do concreto na borda superior e inferior de um protótipo para cada tipo de elemento. Observa-se que o comportamento das curvas de carga versus deformação dos protótipos com elementos de enchimento recicláveis foram similares ao do protótipo com elementos cerâmicos para o nível de carga  $L/500$  e  $L/250$ , o que demonstra que a inserção destes elementos alternativos não provoca modificações significativas na tendência de comportamento estrutural dos protótipos. Além de que, as deformações no instante da ruptura para todos os modelos confirmaram o comportamento dúctil do protótipo, sendo este um dos requisitos fundamentais para o bom funcionamento estrutural.

Figura 31 - Deformação medida com *straingaige* na capa de compressão (C) e na vigota do centro submetida à tração (T) durante o ensaio de flexão.



Fonte: Dados do pesquisador.

### 5.3 ANÁLISE ECONÔMICA.

A avaliação econômica levou em consideração todos os materiais utilizados para sua confecção. A análise foi realizada estabelecendo valores por metro quadrado de laje executada. Esse parâmetro é utilizado para comercialização no mercado. Não foi atribuído custo aos materiais de enchimento reutilizáveis, uma vez que a coleta seletiva, pode ser realizada por trabalhadores sem interesse econômico direto. A Tabela 8 apresenta o resumo dos valores obtidos, onde pode ser observado que os protótipos de PET e lata apresentaram valores 2,05% e 6,28% respectivamente, abaixo das amostras com tavela. Apenas os protótipos que utilizaram embalagens cartonadas ficaram com valor médio de 7,27% acima daquele obtido para as lajes com tavela. No entanto, a maior capacidade estrutural das lajes com embalagens cartonadas, com resistência à flexão de 7,13% acima da laje com tavela (Tabela 6), pode minimizar esse custo, adotando, por exemplo, maiores vãos com equivalência de deslocamento e cargas atuantes.

Apesar das lajes utilizando embalagens recicladas não mostrar uma redução significativa dos custos, o maior valor agregado está na possibilidade de reciclagem dos materiais e, podendo-se considerar um mesmo comportamento mecânico. Pode-se citar, um exemplo de aplicação, como um conjunto habitacional com 1.000 edificações com 50 m<sup>2</sup> cada unidade, a utilização deste tipo de laje (como cobertura ou base), representaria a retirada do meio ambiente de 2,2 milhões de embalagens cartonadas, 4,4 milhões de latas de alumínio e 5 milhões de embalagens de PET. Pode-se inferir que as lajes apresentam melhor eficiência estrutural, devido à redução de seu peso próprio, e um melhor isolamento térmico – pelo menos no caso das garrafas de PET -, contribuindo assim, para eficiência energética das construções.

Tabela 8 - Resumo dos quantitativos e valores gastos na confecção dos protótipos.

Amostra	Vigota		Mat. de ench.		Aço		Concreto fresco		Custo final (R\$/m <sup>2</sup> )	
	Consumo	Custo unitário	Consumo	Custo unitário	Consumo	Custo unitário	Consumo	Custo unitário		
	m/m <sup>2</sup>	(R\$)	(un/m <sup>2</sup> )	(R\$/un)	m/m <sup>2</sup>	(R\$/m)	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	(R\$/m <sup>3</sup> )		
TV1	3,152	5,70	11,030	0,60	10,113	0,397	0,058	235	42,23	
TV2	3,157	5,70	11,050	0,60	10,128	0,397	0,058	235	42,28	
TV3	3,171	5,70	11,100	0,60	10,174	0,397	0,058	235	42,40	
									Média	42,30
PET1	4,157	5,70	99,770	0,0	8,765	0,397	0,062	235	41,74	
PET2	4,131	5,70	99,150	0,0	8,711	0,397	0,065	235	42,28	
PET3	4,185	5,70	100,430	0,0	8,823	0,397	0,055	235	40,28	
									Média	41,43
CX1	4,679	5,70	44,450	0,0	9,319	0,397	0,061	235	44,70	
CX2	4,662	5,70	44,290	0,0	9,285	0,397	0,061	235	44,59	
CX3	4,651	5,70	44,180	0,0	9,264	0,397	0,059	235	44,05	
									Média	44,45
LTI	4,147	5,70	89,170	0,0	8,744	0,397	0,061	235	41,44	
LT2	4,147	5,70	89,170	0,0	8,744	0,397	0,065	235	42,38	
LT3	4,137	5,70	88,930	0,0	8,721	0,397	0,060	235	41,14	
									Média	41,65

Fonte: Dados do pesquisador.



## 6 CONCLUSÃO

Os resultados da pesquisa mostram que a utilização de embalagens descartáveis como materiais de enchimento de lajes pré-fabricadas unidirecionais de concreto apresenta viabilidade técnica e econômica.

Uma das vantagens verificadas foi o peso próprio, que mostrou uma redução média de até 20%, em relação às lajes de referência com tabelas cerâmicas. Foi possível verificar, através de testes de protótipos em escala real, que os componentes reutilizáveis de embalagens cartonadas (LJCX), latas de alumínio (LJLT) e garrafas PET (LJPET) podem substituir os convencionais blocos cerâmicos como material de enchimento para fabricação de lajes pré-fabricadas de concreto. Os resultados mostram que a capacidade de carga na ruptura é superior nas lajes que utilizaram as embalagens recicláveis. Quanto à análise econômica, verificou-se a viabilidade do uso das embalagens, com pequena redução dos custos para as embalagens de PET e LATA.

Assim, a proposta de utilizar embalagens reutilizáveis como elementos de lajes pré-fabricadas se mostrou eficaz, considerando o desempenho estrutural, o processo de execução e a viabilidade econômica. No entanto, a maior contribuição desta proposta é de minimizar o impacto ambiental, quer seja pela redução do descarte das embalagens no meio ambiente ou pela redução do consumo de argila, um recurso não renovável, que apresenta um dano ambiental em sua extração.

Para a continuidade dos estudos desse tema, sugerimos reproduzir o experimento com diferentes embalagens tais como: garrafas de PET semelhantes às utilizadas, porém com maiores dimensões; embalagens cartonadas retangulares adotando a maior dimensão da base como altura na composição da laje; substituir as tabelas comuns por treliçadas; ampliar o estudo e avaliar as vibrações nas diferentes tipologias de lajes.



## REFERÊNCIAS

ANGULO, S. C. et al. **On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete.** Materials and Structures 2010; 43: 519-528.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado** – Editora Dunas –Rio Grande, RS, 2003, V.4, 2ª ed.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14859-1 - Laje pré-fabricada – Requisitos – Parte 1: Laje unidirecional.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - procedimento.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão - deformação.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9062 - Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14862 - Armaduras treliçadas eletrossoldadas - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).  
*NBR 10005- Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.* Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).  
*NBR 10007- Amostragem de resíduos sólidos.* Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).  
*NBR 13.968- Embalagem rígida vazia de agrotóxico -Procedimentos de lavagem.* Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).  
*NBR 14719 - Embalagem rígida vazia de agrotóxico - Destinação final da embalagem lavada - Procedimento.* Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).  
*NBR 14935 - Embalagem vazia de agrotóxico - Destinação final de embalagem não lavada - Procedimento.* Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).  
*NBR 14860-1 - Laje pré-fabricada - Pré-laje - Requisitos - Parte 1: Lajes unidirecionais.* Rio de Janeiro. 2001.

BENAYOUNE, A. et al. **Flexural behaviour of pre-cast concrete sandwich compositepanel – Experimental and theoretical investigations.** Construction and Building Materials 2008; 22:580–592.

BRITISH STANDARD - EUROPEAN STANDARD.*BS EN 15037-1 - Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 1: Beams.* 2008.

BOTELHO, M. H. C. e MARCHETTI, O. **Concreto Armado, eu te amo.** Editora Edgard BlücherLtda, 2002. ISBN: 8521203071

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Calculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118:2003. 2. ed.** São Carlo, SP: EDUFSCAR, 2005.

CENTONZE, G; LEONE, M; AIELLO, M A. **Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical. Characterization.** Construction and Building Materials 2012; 36:46–57

COELHO. F. C. A. **Ecolaje. Utilização de garrafa pet na fabricação de lajes nervuradas.** In:IX CONGRESSO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES. 2006. Habana.Anais...Habana: CUBA. 2006.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **“Longa Vida” vira madeira. CEMPRE Informa, São Paulo: CEMPRE, n. 16, .p. 1, ago. 1994.**

\_\_\_\_\_. Ficha técnica 2. São Paulo: CEMPRE, 1997a.

\_\_\_\_\_. Ficha técnica 10. São Paulo: CEMPRE, 1997b.

**CONAMA RESOLUÇÃO 307/2002**

**CONAMA RESOLUÇÃO 358/2005**

DA SILVA, Henrique Vieira; DA SILVA, Sandro Tavares. **Soluções alternativas para blocos de enchimento em lajes nervuradas:** UNAMA 2010.

KELLER, T; SCHAUMANN, E; VALLÉE, T. **Flexural behavior of a hybrid FRP and lightweight concrete sandwich bridge deck.** Composites: Part A 2007; 38:879–889.

KITSUTAKA, Y.; UCHIDA, Y. **A study on lightweight multifunctional concrete made using waste PET bottles.** Applied Mechanics and Materials. Vol. 193-194, 2012, p. 964-969.

MILANEZ, B.; BÜHRS, T. **Extended producer responsibility in Brazil: The case of tyre waste.** Journal of Cleaner Production 2009; 17: 608-615.

OGI, T S K; MIZUI, M. **Strength in concrete reinforced with recycled CFRP pieces.** Composites: Part A 2005; 36:893–902.

MOHAMMED, B S. **Structural behavior and m–k value of composite slab utilizing concrete containing crumb rubber.** *Construction and Building Materials* 2010; 24:1214–1221.

PELISSER , F. et al. Bernardin A M. **Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition.** *Journal of Cleaner Production* 2011; 19:757-763.

PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – Setembro de 2011.

REBEIZ, K. S., FOWLER, D. W., PAUL, D. R. Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.5, n. 2, 1993, p. 237-248.

SCHALCH, V. **Análise comparativa do comportamento de dois aterros semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbica.** 1992. 220p. Tese de (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SCHAUMANN, E., VALLÉE, T., KELLER, T. **Direct load transmission in hybrid FRP and lightweight concrete sandwich bridge deck.** *Composites: Part A* 2008; 39:478–487.

SILVÉRIO, Marcelo Dal Pont. **Análise da utilização de materiais recicláveis em substituição as tabelas cerâmicas em laje pré-moldada.** 2009. 114 f. TCC (Curso de Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009

SOBRAL, Fábio Luís. **Diagnóstico das cooperativas e associações de catadores de materiais recicláveis nos municípios pertencentes à Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré: realidades e perspectivas.** Dissertação de Mestrado - Centro Universitário de Araraquara - UNIARA 2007.

SUKONTASUKKUL P. **Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel.** *Construction and Building Materials* 2009; 23: 1084–1092.

**WEB-RESOL. Subsídios para a formulação de uma Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Proposta de Moção(1997). Ministério do Meio Ambiente (MMA). Disponível em:  
<http://www.resol.com.br/textos/CONAMA-pol%20de%20res.htm>.  
Acesso em: 14 de dezembro de 2012.

**WEB SUCATA. Reciclagem de garrafas PET.** Disponível em:  
<http://www.websucata.com.br/plastico/artigos/reciclagem-de-garrafas-pet-153.html>. Acesso em 20 de dezembro de 2012.